HAL
open science

Optimisation des conditions de coupe pour l'usinage du bois : application de la méthode Couple Outil Matière au défonçage des panneaux de fibres de densité moyenne

Alfredo Armando Aguilera León

To cite this version:

Alfredo Armando Aguilera León. Optimisation des conditions de coupe pour l'usinage du bois : application de la méthode Couple Outil Matière au défonçage des panneaux de fibres de densité moyenne. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2000. Français. NNT : 2000NAN10002 . tel-01747559

HAL Id: tel-01747559

https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01747559

Submitted on 29 Mar 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

Ecole Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois (ENSTIB)

Groupe de Formation Doctorale : Sciences et Technologies Industrielles

THÈSE

présentée pour l'obtention du titre de

Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy I

en Sciences du Bois

par Alfredo Armando AGUILERA León

BIBLIOTHÈQUE SCIENCES * UNIVERSITÉ NANCY 1 *

Optimisation des conditions de coupe pour l'usinage du bois. Application de la méthode Couple Outil Matière au défonçage des panneaux de fibres de densité moyenne.

Soutenue publiquement le 14 février 2000 devant la commission d'examen :

Membres du jury :

Président	
Pr. A. ZOULALIAN	Professeur, Université Henri Poincaré, Nancy I
Rapporteurs	
Dr. C. SALES	Responsable scientifique du programme Bois – CIRAD Forêt
Pr. J.F. RIGAL	Professeur, Laboratoire C.A.S.M., INSA de Lyon
Examinateurs	
Dr. P.J. MEAUSOONE	Maître de Conférences, ENSTIB, Université Henri Poincaré, Nancy I
Mr. S. GITTON	Société TOOL
Directeur de thèse	
Pr. P. MARTIN	Professeur, ENSAM, Metz.

à Pablo et Viviana

Remerciements

Le présent travail a été réalisé à l'École Nationale Supérieure des Technologies et Industries du Bois (ENSTIB), avec le soutien dans un premier temps du Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN) dans l'équipe d'Ingénierie de Conception et de Fabrication (ICF), et finalement dans l'équipe Ingénierie de Fabrication (IFAB) de l'ENSAM-Metz, dirigé par Mr. Patrick MARTIN.

Je tiens a exprimer mes remerciements aux personnes suivantes :

Mr le professeur Patrick MARTIN, en tant que directeur de thèse, pour les conseils qu'il m'a donné pour bien orienter mon travail. Ses remarques sur mes travaux de recherche ont permis une meilleure structuration de mon travail.

Mes plus sincères remerciements à Mr Pierre–Jean MEAUSOONE Maître de Conférences à l'ENSTIB, pour tout l'intérêt et le temps qu'il m'a consacré. Son aide et son soutien ont été fondamentales pour le bon déroulement de mon travail de recherche.

Mr SALES et Mr le professeur RIGAL pour avoir accepté d'être les rapporteurs de ce travail.

Mr le professeur ZOULALIAN et Mr GITTON pour l'honneur qu'ils me font de participer à ce jury en qualité d'examinateurs.

Ma reconnaissance également à Mr BALLAND, pour son aide dans la résolution des nombreux problèmes mécaniques apparus au cours des essais.

Finalement, je remercie toutes les personnes de l'ENSTIB qui, d'une ou autre manière, m'ont aidé dans la réalisation de ce travail ; au Service de coopération culturelle de l'ambassade de France à Santiago du Chili et au Centre Régional des Œuvres Universitaires et Scolaires (C.R.O.U.S.) de l'académie Nancy – Metz.

Symboles et unités

Symbole	Dénomination	Unité
Fc	effort de coupe, ou effort de coupe total	N (Newton)
Fx	effort de coupe normal	N
Fy	effort de coupe tangentiel	N
$\widehat{FcFy}$	angle entre Fc et Fy	degrés
F0	effort de coupe par cm de longueur de coupe	N/cm
W_{sp}	énergie de coupe ou travail spécifique de coupe	$W/cm^3/min = J/cm^3$
$W_{sp,réf}$	énergie de coupe de référence	$W/cm^3/min$
Pc	puissance de coupe	W
A	direction principale de coupe, dans laquelle la surface usinée est perpendiculaire aux fibres (équivalente à 90-90)	
B	direction principale de coupe, dans laquelle la surface usinée et le mouvement de l'outil sont parallèles aux fibres (équivalente à 90-0)	
C	direction principale de coupe, dans laquelle la surface usinée est parallèle aux fibres mais le mouvement de l'outil est perpendiculaire aux fibres (équivalente à 0-90)	
Vc	vitesse de coupe	m/s
Vf	vitesse d'avance	m/min
N	vitesse de rotation	tr/min
ec	épaisseur moyenne de copeau	mm
fz	avance par dent	mm
Z	nombre des dents	-
ap	profondeur de passe	mm
ae	largeur de coupe	mm
D	diamètre de l'outil	mm
Ke	coefficient d'essence	-
Kh	coefficient d'humidité	-
Ad	section de coupe	mm^2
Q	débit de coupe	cm^3/min
mc	coefficient correcteur de W_{sp}	-
α	angle de dépouille	degrés
β	angle de taillant	degrés
γ	angle de coupe	degrés
XX	paramètre de l'état de surface qui décrit la distance entre pics de rugosité	
YY	paramètre de l'état de surface qui décrit la hauteur des pics de rugosité	
XY	rapport entre XX et YY permettant de comparer différents profils	

SOMMAIRE

INTRODUCTION 1

I. DE L'ENTITE AUX OPERATIONS ELEMENTAIRES 4

1.1. L'industrie de seconde transformation du bois 4

1.2. Modélisation des produits bois 9

1.3. Problématique du matériau bois 12

II. LE BOIS ET SA COUPE 14

2.1. Le bois 14

2.2. La coupe 14
2.2.1. Théorie générale 14
2.2.2. Le fraisage 17
2.2.3. Les efforts de coupe 18
2.2.4. Les recherches sur les efforts de coupe en fraisage 20
2.2.5. L'usure des outils de coupe 23

2.3. Les états de surface 25
2.3.1. Classification des défauts 25
2.3.2. Critères 27
2.3.3. Méthodes de mesure 28
2.3.4. Facteurs inhérents au bois 28
2.3.5. Facteurs liés au processus 29

2.4. L'outil de coupe 31
2.4.1. La géométrie de coupe 31
2.4.2. Les matériaux de coupe 33
2.4.2.1. Aciers rapides 34
2.4.2.2. Les alliages chrome – cobalt 34
2.4.2.3. Les carbures de tungstène 34
2.4.2.4. Le diamant 35

2.5. Facteurs généraux influençant le travail de l'outil 36

2.6. L'usinage du MDF 37

III. LE COUPLE OUTIL – MATIERE (C.O.M.) 39

3.1. Généralités 39
3.2. Travaux antérieurs 40
3.3. L'approche par le COM 41
3.4. Description 41
3.5. Les travaux sur le COM dans le domaine des métaux 45
3.6. L'usinage du bois et COM 48
3.7. Conclusions 53

IV. L'EXPERIMENTATION 54

4.1. Le Matériel Expérimental 54

4.2. Méthodes 57
4.2.1. Définition des essais 57
4.2.2. Traitement des signaux 58
4.2.3. La mesure de puissance 59
4.2.4. La mesure de l'état de surface 59

4.3. Le matériau étudié : le MDF 60
4.3.1. Généralités 60
4.3.2. Caractérisation du matériau 60
4.3.2.1. Détermination de la masse volumique 60
4.3.2.2. Détermination de l'humidité 61
4.3.3. L'humidité et la densité caractérisation lors des essais 62
4.3.4. Essais préliminaires de caractérisation de Ke 63
4.3.4.1. La coupe 63
4.3.4.2. Les efforts de coupe 64
4.3.4.3. La puissance de coupe 66
4.3.4.4. Les états de surface 67

4.4. Démarche expérimentale 69
4.4.1. Conditions générales 69
4.4.2. Essai de qualification 70
4.4.3. Détermination de la vitesse de coupe minimale 72
4.4.4. Détermination de l'épaisseur de copeau mini et maxi 72
4.4.5. Détermination des données limites 73
4.4.6. Essai d'usure 74

V. RESULTATS 75

5.1. Recherche du point de fonctionnement 75
5.1.1. Les efforts de coupe 75
5.1.2. La puissance de coupe 76
5.1.3. L'analyse des surfaces 78
5.1.4. Analyse des réponses dues à l'état de surface 79

5.2. La vitesse de coupe minimale Vc_{min} 81
5.2.1. Les efforts de coupe 81
5.2.2. La puissance de coupe 82
5.2.3. L'état de surface 82

5.3. L'épaisseur de copeau minimum et maximum 84
5.3.1. L'effort de coupe 84
5.3.2. La puissance de coupe 85
5.3.3. L'état de surface 85

5.4. Les données limites 87
5.4.1. Section maximale de coupe 87
5.4.2. Le débit maximum de coupe 91

5.5. Essais d'usure 94
5.5.1. Etat de l'art 94
5.5.2. Méthodologie 95
5.5.3. Résultats 96

5.6. Essai de détermination des paramètres auxiliaires 102

5.7. Résumé des résultats 104

VI. CONCLUSIONS 112

VII. LES PERSPECTIVES DU COUPLE OUTIL MATIERE 115

VIII. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 117

IX. ANNEXES 123

9.1. Méthode d'obtention du Couple Outil Matière 124
9.2. Les formules de l'usinage 133
9.3. Détermination théorique de l'épaisseur moyenne de copeau 134
9.4. L'axe grande vitesse. Mode d'emploi 136
9.5. Comportement mécanique du MDF 141
9.6. Statistiques des essais 149

INTRODUCTION

L'évolution des moyens de production dans l'industrie du bois et la concurrence internationale imposent aujourd'hui des rentabilités de plus en plus élevées. L'apparition des nouvelles technologies et matériaux de coupe vont être des points clés dans la productivité des processus de fabrication.

Dans un contexte industriel, l'utilisation du bois est très diversifiée, donnant des entreprises différentes, avec des machines et des modes de transformation très spécialisés, dépendant du produit à fabriquer. Ainsi, chaque machine-outil est associée à un produit donné, dont l'intérêt est de maîtriser les conditions d'usinage dues aux coûts fixes très importants des machines. Avec des conditions optimisées, la perte de matière et la fréquence de changement d'outils sont minimisées, de même que les coûts de production liés à chaque pièce. Ainsi, la rentabilité de la machine est améliorée.

L'importance d'encadrer les conditions de coupe par certaines limites est liée au type de matériau à usiner, puisqu'il détermine le comportement de la coupe. Il est donc d'un grand intérêt de connaître l'interaction entre l'outil et la matière, pour établir une base de données. Cela permettrait d'identifier, pour chaque outil, les conditions acceptables de coupe dans une matière déterminée. De cette façon, il sera possible de délimiter les conditions de travail de l'outil pour maximiser sa durée de vie tout en gardant un état de surface correct et un respect de la sécurité du travail. Un problème fondamental de l'industrie du bois est la méconnaissance de la plage des conditions de coupe par un usinage correct. Ce problème se passe en particulier dans l'industrie de l'ameublement. Il est dû en particulier à l'hétérogénéité du matériau. On ne peut choisir que des valeurs moyennes des conditions de coupe. D'autre part, les machines classiques de l'industrie du bois ne possèdent que rarement la possibilité de variation continue de la vitesse de coupe ou de la vitesse d'avance. Les nouvelles machines à commande numérique peuvent y répondre, mais avec un investissement plus important.

Afin de déterminer les conditions de coupe optimales, il faut recourir à une méthode couramment utilisé dans l'industrie du métal : le Couple Outil Matière (COM)[AFN95b]. La réduction de temps de mise au point d'une nouvelle production, la réduction des délais d'industrialisation et la rationalisation des coûts sont les avantages majeurs de cette méthode. L'applicabilité au niveau de la coupe des métaux se révèle chez les utilisateurs d'outils coupants. Ils économisent du temps dans la mise en fabrication en résolvant plus facilement les problèmes d'usinage. Ainsi, quelques heures de test au laboratoire économisent un grand nombre d'heures en atelier.

Cette méthode présente aussi l'avantage de définir d'une façon simple, une zone où les conditions de travail de l'outil sont fixées d'après une série de contraintes à respecter. Celles-ci sont déterminées à l'avance par les limites de la machine (puissance), l'état de surface ou des conditions particulières (profondeur de passe...). Les résultats génèrent une zone appelée zone d'emploi sous contrainte, qui permet d'assurer la faisabilité du travail.

Le domaine global de validité est donné par le fabricant d'outil ou le logiciel [TOO96], puis il est restreint par la prise en compte des conditions spécifiques à la suite

d'essais effectués sur site en quelques heures. De ce fait, il est très intéressant de voir son applicabilité et sa validité dans le domaine du bois.

Dans le domaine du bois et ses dérivés, nous trouvons principalement les problèmes suivants:

- En effet, dans ce domaine on rencontre un comportement anisotrope, des variations parfois brutales de la masse volumique. Des échantillons prélevés dans une même planche peuvent avoir des niveaux assez différents.
- L'aspect esthétique du produit usiné est difficilement quantifiable, parce que l'on trouve au niveau de sa surface des éléments comme la structure anatomique, les cernes de croissance, les zones de différente densité dans des panneaux à fibres, etc... qui conduisent à des différences d'appréciation de la qualité.
- L'anisotropie, l'hétérogénéité, l'abrasivité du bois, sont aussi très importantes et ont de fortes variations sur les résultats en termes de puissance, d'efforts de coupe et de qualité de surface.

Le but du présent mémoire est d'étudier la possibilité d'utiliser la méthode Couple Outil – Matière (COM) de prédétermination des conditions de coupe, pour le bois et les matériaux à base de bois.

Avec cette démarche innovante pour l'usinage du bois, nous chercherons à expliquer le rapport de la constante d'essence avec l'effort de coupe, l'influence du changement de la densité et du type de coupe.

La connaissance de l'usure de l'arête de coupe sur le comportement de l'effort de coupe, sera également abordée, afin de déterminer la durée de vie de l'outil.

L'application a été réalisée sur du panneau de fibre moyenne densité (Medium Density Fiberboard - MDF), ce matériau est très utilisé en ameublement, vernis ou peint après usinage, présentant une certaine homogénéité de densité. Ainsi, nous pouvons espérer avoir moins de contraintes que pour le bois massif.

Dans le corps du mémoire, nous traiterons les points suivants : Dans le chapitre 1, nous introduisons le problème depuis son expression élémentaire : l'entité usinage dans l'industrie de seconde transformation du bois. Ceci nous permet de cibler le produit d'une façon technique, qui lie la fonction d'une pièce et le processus associé.

Dans le chapitre 2 nous traitons les aspects généraux du bois et de sa coupe, pour mieux préciser ce phénomène. Des éléments essentiels comme le processus de coupe, les états de surface, l'outil et la matière, qui permettent de faire l'application du COM sont définies.

Le concept du Couple Outil – Matière est traité dans le chapitre 3. Les généralités sont énoncées à partir d'une recherche bibliographique avec des applications à la coupe de métaux. En effet c'est dans ce domaine d'exploitation que cette méthodologie a été initialement développée. La deuxième partie de ce chapitre montre la faiblesse de la recherche réalisée dans le domaine du bois. Très peu d'études sont disponibles, elles ne laissent que des idées très sommaires sur le sujet.

L'expérimentation est présentée dans le chapitre 4. Nous faisons une description du matériel et méthodes de mesure. Nous abordons la mise en place du plan d'expérience et des développement de la série d'essais d'après les normes AFNOR.

Les résultats sont traités dans le chapitre 5, avec dans la partie finale une analyse de l'usure suivant une nouvelle méthodologie pour sa détermination. Nous proposons le domaine de validité de l'outil, restreint en terme de vitesse de coupe, d'épaisseur de copeau et de débit de coupe, qui maximisent la durée de vie de l'outil lorsqu'il travaille sur le MDF.

Les conclusions sont présentées dans le chapitre 6 et les perspectives dans le chapitre 7.

I. DE L'ENTITÉ AUX OPÉRATIONS ÉLÉMENTAIRES

1.1. L'industrie de seconde transformation du bois.

1.2. Modélisation des produits bois.

1.3. Problématique du matériau bois.

I. DE L'ENTITÉ AUX OPÉRATIONS ÉLÉMENTAIRES

1.1. L'industrie de seconde transformation du bois

1.1.1. Généralités

Le bois est une matière qui a toujours été une source d'activités intenses et très diversifiées. Les produits de la sylviculture et de l'exploitation forestière subissent de nombreuses transformations qui aboutissent à l'approvisionnement de marchés très différents par la nature des agents économiques concernés et le type de biens fournis.

Ainsi, la culture, la récolte et la transformation du bois fondent ce que l'on appelle couramment la filière Forêt - Bois. Donc, le concept de filière fait référence à l'idée qu'un produit, bien ou service est mis à la disposition de son utilisateur final par une succession d'opérations effectuées par des unités ayant des activités diverses. Chaque filière constitue donc une chaîne d'activités qui se complètent, liées entre elles par des opérations d'achats ou de ventes. Cette chaîne est décomposable en segments depuis l'extraction de la matière première et la fabrication de biens d'équipement, jusqu'à la distribution et aux services liés au produit.

Dans la filière Bois, les différents stades de la transformation peuvent être schématisés comme suit (figure 1) :

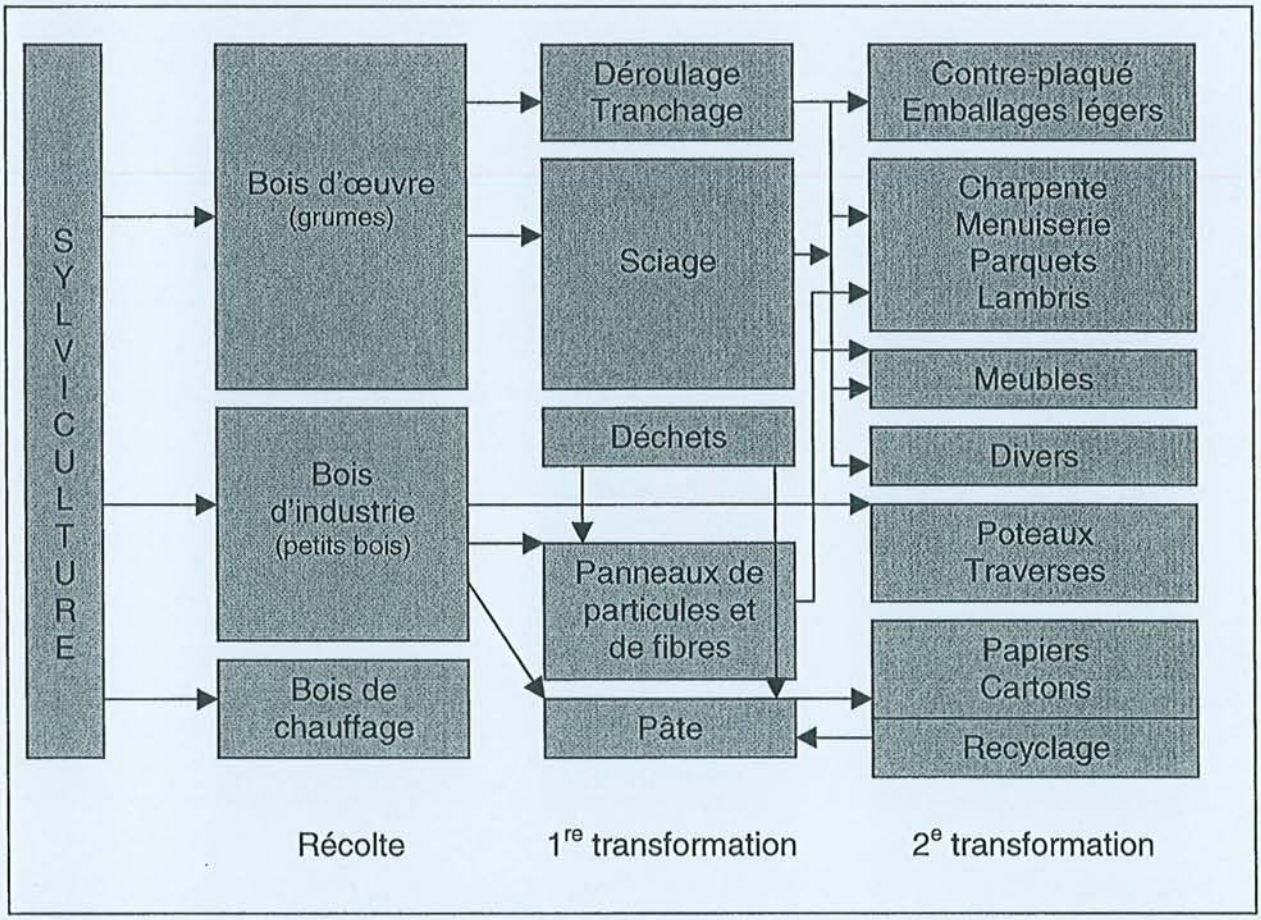


Figure 1 : Stades dans la transformation du bois.

La sylviculture et l'exploitation forestière forment un « tronc commun », dont la nature, le fonctionnement et la production sont caractérisés plus par une activité agricole qu'industrielle. La première transformation est une étape fondamentale qui a pour objet de faire qu'un arbre sur pied devienne un produit. Elle permet d'optimiser l'allocation de la ressource forestière en fonction de la demande industrielle. Et la seconde transformation permet aux industriels l'utilisation de la matière première élaborée en amont.

Pourtant la récolte des bois permet d'offrir une large variété de produits commercialisés à différentes étapes de leur transformation :

- les récoltes forestières (bois d'œuvre, d'industrie ou de chauffage),
- les produits semi finis de la première transformation (sciages, placages et produits connexes issus du débit, panneaux et pâtes),
- les produits de la seconde transformation (emballages, composants pour le bâtiment, meubles et papiers cartons).

Les produits de la seconde transformation peuvent être regroupés en trois types d'industries :

- les industries du bâtiment : comprenant essentiellement les fabriques de parquets, de moulures, d'éléments de charpente, de menuiseries (fenêtres, portes, volets, escaliers, ...) et les entreprises de pose de ces éléments,
- les industries du travail divers du bois : emballage, instruments divers en bois, bâtiments préfabriqués légers,
- les industries de l'ameublement : meubles meublants, sièges, meubles de cuisine, lits.

1.1.2. Les Produits de l'ameublement

De plus, cette seconde transformation constitue le passage du produit semi-fini (bois massif ou les panneaux), au produit fini. Mais il faut considérer quatre aspects qui caractérisent ce stade :

- le matériau : le bois, matière hétérogène et anisotrope qui présente des défauts et réagit aux changements d'humidité par des déformations géométriques,

- les pièces : elles doivent répondre à certaines restrictions d'ordre esthétiques et de résistances. Les pièces sont usinées sur toutes les faces. Le profil résultant est l'enveloppe de la forme de l'outil,

- le processus : il est quasi – linéaire [cf. figure N°2].

- Les produits bois sont caractérisés par des notions techniques (dimensions, assemblage,...) et des notions subjectives (esthétique, choix de l'essence, finition). Pour l'industrie de l'ameublement, par exemple, ceux-ci ont un usage essentiellement domestique.

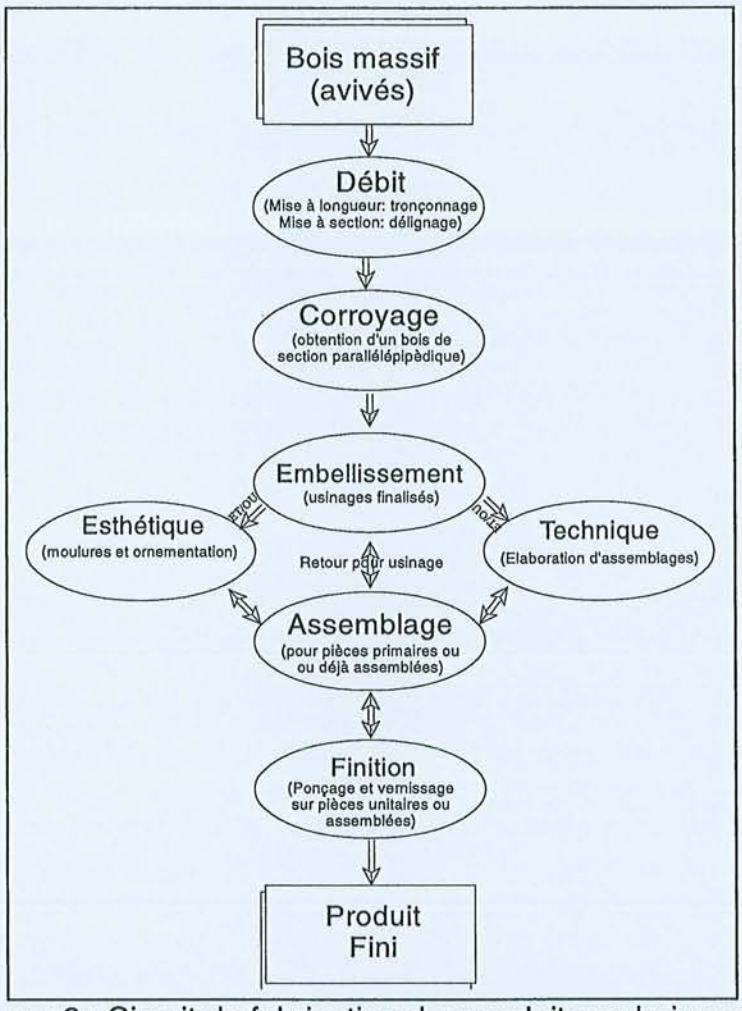


Figure 2 : Circuit de fabrication des produits en bois massif [MEA96].

Légende : Lors du déroulement de la fabrication d'un produit bois massif (figure 2), les différents éléments passent nécessairement par les phases de débit et de corroyage, afin de déterminer des bois corrects dans leur géométrie (chants et faces // et □ deux à deux) et dans leur esthétique (choix à ce niveau du parement d'une pièce, c'est à dire la plus belle face). A partir de ce niveau, les choses deviennent complexes et dépendent de facteurs techniques, mais également de choix humains. Les pièces peuvent être traitées isolément ou pré-assemblées. Ceci est valable à tous les niveaux. La règle fondamentale du bois est le mélange subtil entre les usinages techniques et/ou esthétiques, afin d'obtenir un produit solide et beau. L'orientation actuelle est "d'éliminer" les deux premières opérations (débit et corroyage) et de les laisser à la scierie, qui installe des raboteries à cet effet.

Ainsi, le résultat donne des entreprises très différentes en terme de taille, circuits de fabrication et de connaissance du métier.

Aujourd'hui, les entreprises de l'industrie manufacturière de seconde transformation du bois présentent un haut niveau de diversification en terme de produits avec une part de plus en plus prépondérante des panneaux dérivés du bois.

Ces produits de l'ameublement peuvent être classés de la manière suivante :

Secteur	Produit
Ameublement – cuisine	Portes de meubles de cuisine et de salle de bain
Ameublement – siège	Carcasse de siège, chaise, fauteuil
Ameubl. – meuble meublant	Meuble de style, porte de meuble, meuble moderne
	[MEA96]

La plupart des produits fabriqués par ce secteur peut être constitué avec le MDF. Nous trouvons par exemple le cas de fabricants de meubles traditionnels qui font l'usinage direct des chants de panneaux plaqués bois. En plus, ce produit est de plus en plus utilisé pour réaliser des plateaux de tables, des portes et des façades de tiroirs et des autres éléments plans à chants usinés. Un autre intérêt est l'esthétique où nous trouvons les moulures décoratives rapportées, collées sur les portes d'éléments de cuisine et de chambre, les façades de tiroir et les meubles de style entre autres.

1.1.3. Le cas du panneau de fibre moyenne densité

Présentation : Le panneau de fibre moyenne densité a son origine aux Etats Unis où sa dénomination est Medium Density Fiberboard – MDF. Ce panneau est un dérivé du bois fabriqué à partir de fibres de bois liées entre elles par un adhésif synthétique. Ce matériau montre une utilisation orientée principalement vers la fabrication du meuble en complément ou en remplacement du bois massif.

Bien accepté par les fabricants de meubles, ce matériau est de plus en plus mis en œuvre en aménagement intérieur et dans le bâtiment. Contrairement à la plupart des autres panneaux dérivés du bois, la répartition des fibres, uniforme et dense dans toute l'épaisseur du panneau MDF, permet un usinage très précis sur les faces et sur les chants, sans risque d'éclats ou d'apparition de vides dans l'épaisseur du panneau, de même que l'application de finition et une facilité pour la fabrication d'assemblages.

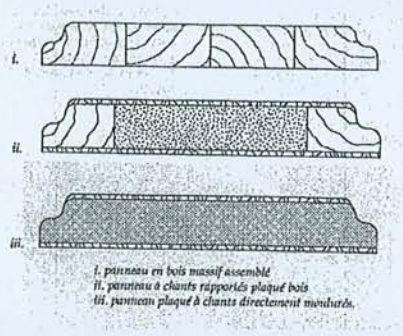
Fabrication: Les panneaux de fibres de moyenne densité sont fabriqués par voie sèche. Les fibres sont séchées avant d'être disposées en mat pour le pressage. En absence d'eau, et à une température de pressage plus basse que pour la fabrication des panneaux de fibres durs, la liaison entre les fibres par la résine naturelle du bois est insuffisante. En conséquence, la résistance élevée des panneaux MDF est obtenue par l'addition d'un adhésif à base de résine synthétique. La masse volumique des panneaux MDF, de 450 à 1000 kg/m^3, recouvre le domaine des panneaux de fibres, mais l'adhésif synthétique ajouté au panneau MDF lui confère des caractéristiques mécaniques supérieures à celles des panneaux mi–durs [CTB95].

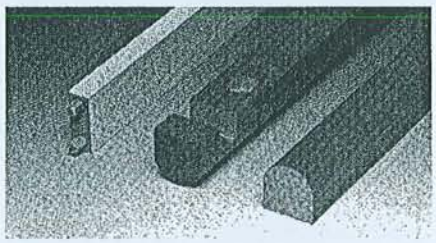
La vaste gamme de masse volumique des panneaux MDF s'explique en partie par la diversité des épaisseurs disponibles: de 1,8 à 60 mm. Les panneaux de faible épaisseur ont une masse volumique plus élevée que les panneaux plus épais.

Utilisation : Les panneaux MDF standard sont employés avec succès pour faire des plateaux de table, des portes et des façades de tiroirs à chants moulurés ou surfaces usinées. Les surfaces constituent un excellent support pour appliquer une peinture, une feuille décorative ou un placage bois. Sa stabilité, sa bonne aptitude à l'usinage et sa résistance élevée en font un matériau propre à remplacer le bois massif pour des applications telles que côtés ou fonds de tiroirs, traverses de meubles, encadrements et moulures [CTB95].

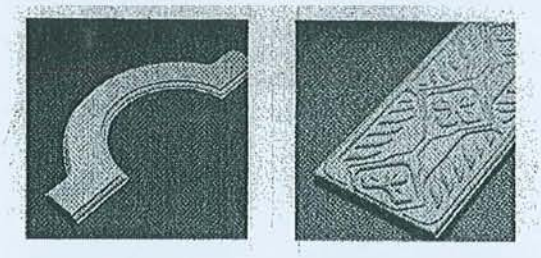
Les chants usinés sont particulièrement sensibles aux variations de qualité esthétiques des surfaces liées à l'hétérogénéité ou à l'anisotropie du matériau. Aussi les produits portant notre intérêt sont :

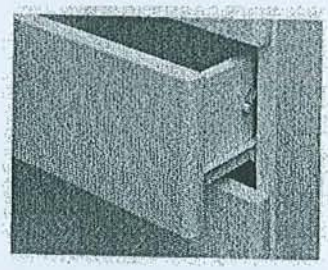
- les panneaux plaqués à chants directement moulurés (fabrication meubles traditionnels),
- les profilés enrobés (meubles d'agencement et meubles meublants ; les cadres de portes, les cadres de miroir, les corniches et lambrequins pour les cuisines intégrées, les moulures décoratives sur les panneaux, les traverses structurelles dans les éléments de cuisine, les côtés et poignées de tiroirs),





- les moulures décoratives (portes d'éléments de cuisine, de chambre, les façades de tiroir, les argentiers, les têtières de lit, les meubles de style),
- les éléments haut et bas des cuisines et les composants et accessoires d'une cuisine intégrée.





En fait, il est souvent dit que le MDF ne présente pas de grands problèmes d'usinage, pourtant l'usinage sur chant est délicat, parce que c'est ici qu'on trouve des problèmes liés au collage et à l'application de finitions. Nous ne connaissons pas très bien quelles sont les conditions de coupe qui agissent sur la qualité du chant du MDF nous permettant de trouver l'état de surface acceptable en vue d'une application d'un produit de finition. La maîtrise de l'état de surface sera importante pour atteindre l'usage attendu.

1.2. Modélisation des produits bois

1.2.1. Introduction

En seconde transformation, un produit bois présente la particularité d'avoir une forme initiale élémentaire très souvent parallélépipédique et son orientation dans l'espace peut être définie, comme le montre la figure 3.

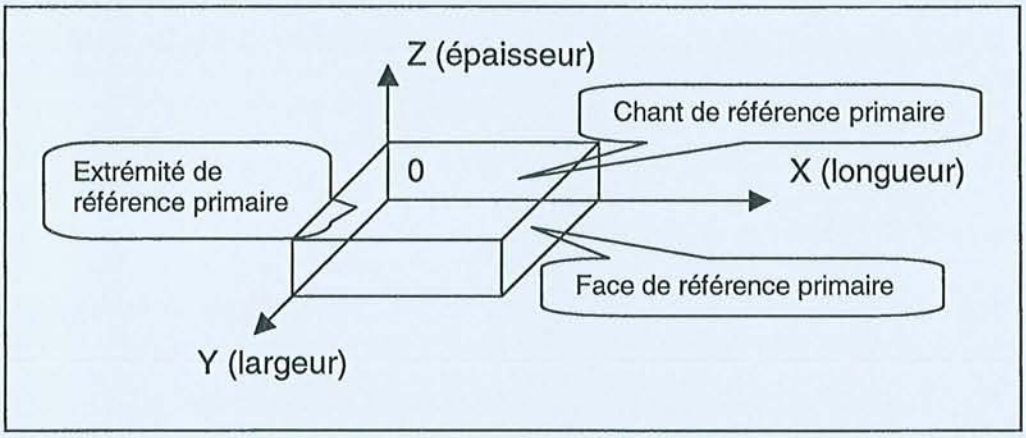


Figure 3 : Orientation d'une pièce dans l'espace.

Ainsi [MEA96] définit la géométrie globale d'une pièce par rapport à un référentiel. Les composants de la pièce sont essentiellement ses faces géométriques. Elles permettent de positionner ce référentiel.

Dans l'industrie du bois, il est possible de faire une description morpho - dimensionnelle des pièces. La part morphologique correspond à la recherche de différentes formes, tant esthétiques que techniques. La part dimensionnelle permet de caractériser les pièces par des classes de dimensions auxquelles on peut associer des machines et des opérations d'usinage.

Pour l'aspect morphologique de la pièce, il faut différencier la composante géométrique de l'esthétique. La première fait référence au positionnement, au dimensionnement et à l'assemblage, tandis que l'aspect esthétique rend compte du type de finition, des types d'assemblages et des moulures, cependant se pose le problème de l'évaluation de ce caractère.

L'orientation dans l'espace d'un produit bois permettra donc, en l'associant avec ses caractéristiques techniques et ses entités d'usinage qui le constituent, de définir les attributs pour une utilisation dans des bases des données.

1.2.2. Notion d'entité

Nous introduisons ici le concept d'entité, qui permettra de mieux décrire une pièce dans ses aspects géométriques et en même temps prendra en compte le processus de production, en donnant les spécifications relatives de celui-ci, et qui est très utile au processus de conception et de fabrication.

Il existe de nombreuses définitions et interprétations de la notion d'entité. On trouve par exemple les entités géométriques, de forme, fonctionnelles, de liaison, d'assemblage, topologiques, de fabrication, d'usinage, de posage, de prise de pièce, de précision, de brut, de matériaux, administratives... [DER95].

Une définition générique donnée par [MAR96] indique que : l'entité est un atome de modélisation caractérisé par un ensemble de paramètres définissant une forme et une sémantique (expertise, savoir faire métier ou entreprise). Elle permet de décrire un objet indécomposable utilisé dans le raisonnement relatif à une ou plusieurs activités liées à la conception et l'utilisation des produits et des systèmes de production.

Pour faire un lien plus direct avec le processus de fabrication, nous trouvons la définition donnée par le groupe GAMA [GAM90] sur l'entité d'usinage : Une entité d'usinage est une forme géométrique et un ensemble de spécifications pour lesquels un processus d'usinage est connu. Ce processus est quasi indépendant des processus des autres entités.

Ainsi les bénéfices de l'approche par entités permettra de faciliter l'intégration avec les activités en aval, de stocker un haut niveau sémantique d'informations au début de la conception, d'assurer la non répétition des informations et d'éviter la rupture d'informations entre les applications [MAR96].

Ce facteur d'intégration que représente l'entité entre la fabrication et la conception, permet donc de bien définir un produit dans l'industrie de seconde transformation (d'après [MAR96] l'intégration conception – fabrication est particulièrement bien adapté dans l'industrie du bois), ainsi, le produit défini par un ensemble d'entités fonctionnelles, est finalement associé à l'entité d'usinage, où celle-ci est directement liée à la trace d'outil, définie par sa forme, sa position (par rapport à l'entité) et son mouvement.

Cette entité d'usinage est un moyen de représenter un produit. Ainsi, le modèle qui en résulte doit permettre de résoudre les problèmes de communication entre les différents acteurs de la production. Ce modèle intègre les données géométriques, fonctionnelles, structurelles et technologiques d'une façon homogène et cohérente [BRA96].

1.2.3. L'entité de production

Le lien entre différentes entités amène à de nouvelles définitions des entités. Ainsi, l'entité de production permet de décrire une pièce suivant différents aspects de son circuit dans l'entreprise. [MAR96] indique que la définition des entités de production est le résultat du regroupement des entités fonctionnelles([1]) et de fabrication. Cette nouvelle entité représente à la fois les aspects de conception et les aspects de réalisation d'un produit, ce qui est valable en particulier dans les pièces bois.

([1]) *les entités fonctionnelles* représentent des solutions techniques et pas de fonctions, ainsi par exemple, toutes les fonctions ne sont pas remplies par des entités fonctionnelles et elles peuvent être réalisées par des composants. Ces entités présentent des contraintes qui sont caractérisés par les tolérances d'orientation et de position des surfaces, et que pour comprendre ces contraintes qui lient les entités il faut regarder le produit dans son ensemble car elles sont réparties dans plusieurs pièces. Enfin pour constituer la pièce dans son ensemble, les entités fonctionnelles doivent être reliées entre elles.

Pour déterminer une entité de production, [MEA96] indique que cette entité est un concept constitué d'un trinôme indivisible (une géométrie, une sémantique et un usage). Elle représente un objet unitaire, esthétique ou technique, de conception et d'usinage. Son utilisation permettra ainsi de formaliser les connaissances et chaque utilisateur pourra agir directement en donnant ses propres contraintes et traitements.

En plus [MEA96], ajoute certaines contraintes telles que l'utilisation par tous les acteurs de l'entreprise, que l'action de chaque utilisateur pour trouver les éléments dont il a besoin, et que les attributs des entités sont évalués par les utilisateurs.

Ce même auteur indique que pour répondre à la question de savoir réaliser, les entités de production sont créées à partir des entités d'usinage. Il a ainsi caractérisé les entités de base : plan, rainure, tenon, moulure, révolution, trou et quelconque. Il ajoute que ces entités vont permettre de déterminer l'entité de production selon les fabrications et éléments utilisés.

Ainsi, une pièce sera décrite par un ensemble d'entités permettant de décrire les contraintes fonctionnelles et des paramètres de fabrication.

1.2.4. Utilisation

L'entité se présente donc comme une forme géométrique associée à certaines fonctions de différentes ordres (figure 4). Une pièce est alors constituée par un ensemble d'entités associées à un repère par rapport au repère pièce (figure 5).

Fonctions	caractères	entité
esthétique	indépendant des autres entités défini par la régularité de la forme et l'état de surface	plan, moulure, sculpture
assemblage	lien entre deux pièces bois ou avec des accessoires (quincaillerie) définie par ses tolérances entités définies par couples (entités conjuguées)	plan (plan), profil (contre profil), trou (tourillon, accessoire) rainure (languette, fausse languette, panneau), languette (rainure) tenon (mortaise), mortaise (tenon), enfourchement (enfourchement)
référençage	lien par rapport à un support définie par ses tolérances	plan, rainure, trou
usage	lié à l'utilisation, séparation, résistance mécanique résistance aux agents extérieurs:chaleur,lumière,humidité...	plan, forme quelconque
cinématique	permettre un mouvement de translation, de rotation, hélicoïdal le plus souvent réalisé par un élément accessoire (charnières...)	rainure, languette, vis

Figure 4 : Les principales fonctions associées aux pièces bois [MAR96].

Entité d'usinage	interaction/ autre entité	repère local/ orientation fibres	n°	processus	outil	axe outil/surface	axe broche	avance	critères de choix
plan positionné par rapport à un autre	perpendiculaire	L : x, e : y	1	sciage	scie circulaire	perpendiculaire : z	z	x	débit initial
état initial : surface brute avec surépaisseur	(chant)	L : direction des fibres e : épaisseur		rabotage	rabotage	parallèle : y	z	x	le plus courant
				ponçage	bande	parallèle : y	z	x	état de surface
			2	sciage	scie circulaire	perpendiculaire : z	z	x	
				fraisage en bout	fraise	perpendiculaire : z	z	x	rare
				ponçage	bande	parallèle : y	z	x	état de surface
rainure non débouchante sur chant	assemblage	L : x, e : y	1	rainurage	à rainer	parallèle : y	z	x + y	abouts arrodis
état initial : pièce corroyée			2	rainurage	fraise 2T	perpendiculaire : z	z	x + y	rare

Figure 5 : Exemple d'attributs pour des entités plan et rainure [MAR96].

Les 7 entités définies par [MEA96] vont nous permettre d'établir les caractéristiques souhaitées de l'outil de coupe (forme, géométrie, diamètre), et ses paramètres d'usinage (profondeur de passe, largeur de coupe). L'établissement des entités de production permet finalement de bien orienter les besoins d'outils et du type de machine adaptée à la réalisation d'un usinage particulier, afin d'obtenir un produit respectant les contraintes données dans le processus de conception.

1.3. Problématique du matériau bois

On constate que dans l'industrie du bois les procédés de transformation sont souvent orientés selon le produit défini par son matériau et sa forme. Ainsi un procédé déterminé est associé à une machine en particulier. Les processus sont quasi linéaires et requièrent de nombreuses machines. Chacune réalise une opération spécifique, dépendant de l'entité usinage choisie. De plus, chaque entité est associée à un outil de coupe qui réalise une opération spécifique. Les réglages et les paramètres de coupe sont fonction du matériau à usiner. Le problème est la détermination des conditions de coupe appropriées pour chaque entité (figure 6).

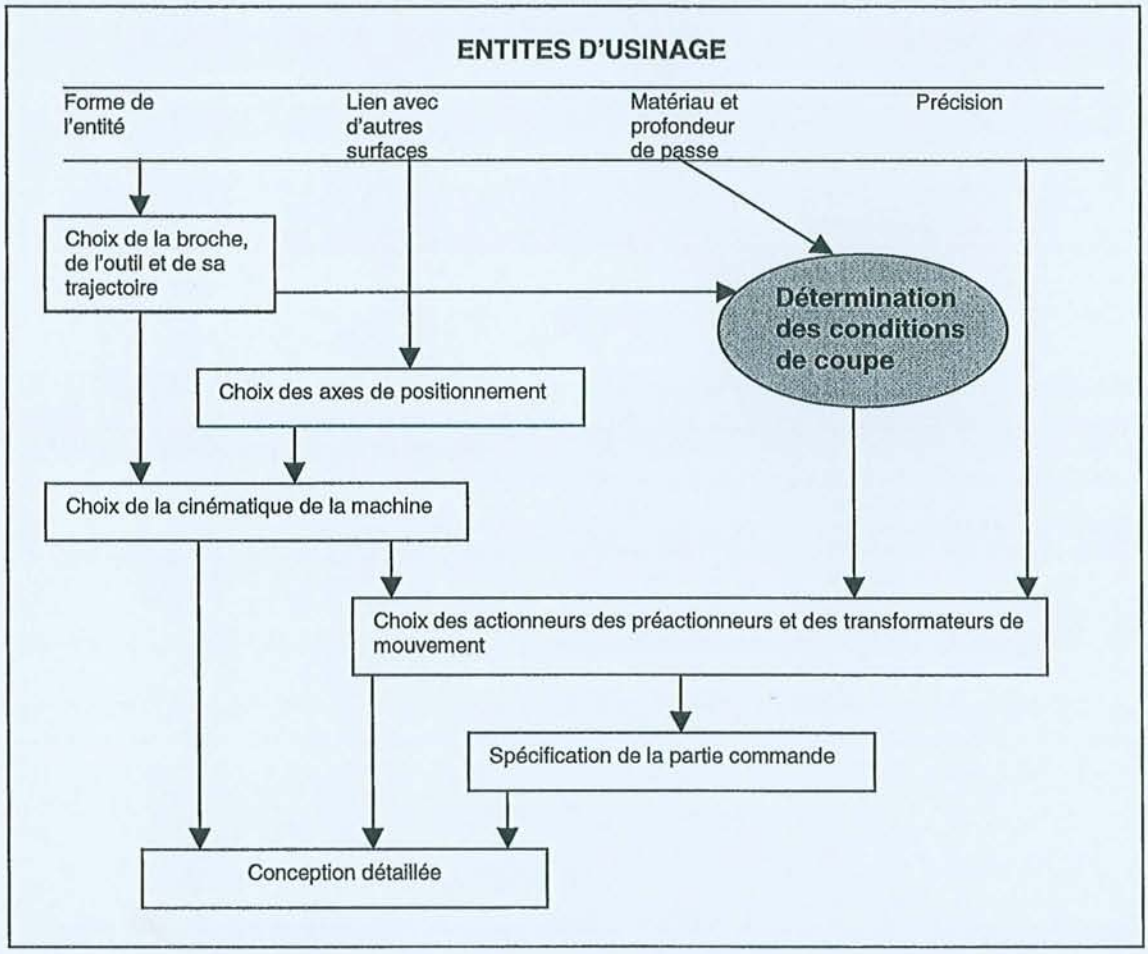


Figure 6 : La détermination des conditions de coupe dans une entité d'usinage [GAR92].

Les conditions de coupe sont réglées par rapport aux limites de la machine et de l'outil, avec objectifs de productivité et de qualité. Pour l'usinage des métaux, beaucoup d'informations techniques sont disponibles. Si l'on souhaite usiner tel ou tel matériau, les réglages de la machine changent pour atteindre un résultat précis en termes d'état de surface ou de durée de vie d'outil, par exemple.

Mais dans l'usinage du bois, nous ignorons quelle est la vitesse de coupe pour une durée de vie d'outil maximale. Si les conditions de coupe sont constantes, avec une essence très abrasive, est-ce que la durée de vie de l'outil sera la même ? Ainsi, de nombreuses questions se posent.

Pour tenter de répondre à ces questions, nous allons utiliser un concept couramment utilisé dans l'industrie de l'usinage des métaux : la méthode du ***Couple Outil Matière*** (COM). Cette méthodologie prend en compte d'une part les caractéristiques de l'outil (sa géométrie, sa composition) et d'autre part, la matière à usiner (dureté, densité, ...), pour optimiser les conditions de coupe, pour quantifier la durée de vie de l'outil, et pour trouver un état de surface convenable à l'usage attendu de la pièce. Le chapitre 3 fait la description de la méthode COM. Au préalable nous présentons les paramètres de base décrivant la coupe du bois.

Ainsi, en déterminant la faisabilité de l'application de cette méthode au domaine bois, nous pourrons établir une « base de données » usinage, spécifique à chaque machine – outil, et pour chaque matière concerné. De cette façon, les de réglages des opérations sur une machine peuvent être minimisés. Des économies réalisées grâce à un travail optimal des outils. Ceci est particulièrement intéressant pour les grandes entreprises de l'ameublement usinant des panneaux.

II. LE BOIS ET SA COUPE

2.1. Le bois.

2.2. La coupe.

- 2.2.1. Théorie générale.
- 2.2.2. Le fraisage.
- 2.2.3. Les efforts de coupe.
- 2.2.4. Les recherches sur les efforts de coupe en fraisage.
- 2.2.5. L'usure des outils de coupe.

2.3. Les états de surface.

- 2.3.1. Classification des défauts.
- 2.3.2. Critères.
- 2.3.3. Méthodes de mesure.
- 2.3.4. Facteurs inhérents au bois.
- 2.3.5. Facteurs liés au processus.

2.4. L'outil de coupe.

- 2.4.1. La géométrie de coupe.
- 2.4.2. Les matériaux de coupe.

2.5. Facteurs généraux influençant le travail de l'outil

2.6. L'usinage du MDF

II. LE BOIS ET SA COUPE

Ce chapitre est un bilan sur la coupe dans le bois. Nous le considérons comme un rappel indispensable. Il donne une vue générale et permet de mieux comprendre les problématiques associées à la coupe de ce matériau.

2.1. Le bois

Pour la définition du matériau bois, le lecteur peut se référer à de littérature spécifique s'il a besoin de connaissances approfondies. Nous pouvons citer : [ARB94]; [COR79], [DET88], [JAC73] et [PAN81].

Il est important de rappeler que la structure du bois a certaines influences sur sa transformation mécanique. Ainsi, le bois peut se décrire comme un empilage de tubes (vaisseaux, trachéides) suivant une direction principale ou longitudinale. Ces éléments sont entrecoupés par des autres constituants qui suivent une direction perpendiculaire (trachéides, rayons ligneux). Tous ces éléments qui sont en croissance vont générer des irrégularités naturelles comme les cernes d'accroissement différents ou due à la non linéarité de cette croissance et une pente de fil du bois très variable. Les résultats de cette variabilité influent sur les déformations géométriques des pièces, dont l'importante croît avec l'humidité. Toutes ces données ont une influence très importante sur l'usinage.

2.2. La coupe

2.2.1. Théorie générale

Le bois est un matériau anisotrope, c'est à dire que ses constituants comme les fibres et rayons médullaires sont orientées dans trois directions principales :

- une direction axiale ou longitudinale, suivant l'orientation des fibres,
- une direction radiale, perpendiculaire à la direction axiale,
- une direction tangentielle, qu'est perpendiculaire aux deux précédentes.

La conséquence de l'anisotropie est une différence de comportement du matériau suivant le sens de sollicitation.

On a ainsi pour l'usinage du bois défini trois directions principales (figure 7): (A) une direction perpendiculaire aux fibres, où l'arête de coupe est aussi perpendiculaire aux fibres (coupe transversale), aussi appelée coupe d'orientation 90-90 (*), qui correspond au tronçonnage et tenonnage; (B) une direction parallèle aux fibres (coupe longitudinale) ou coupe 90-0 correspondant au rabotage, sciage et toupillage et (C) coupe tangentielle ou coupe 0-90 correspondant au tranchage – déroulage. Dans la pratique, la coupe du bois ne s'effectue que rarement suivant une seule de ces directions. Souvent l'arête ainsi que la face d'attaque des outils sont inclinées par rapport aux fibres suivant un angle dit de déviation.

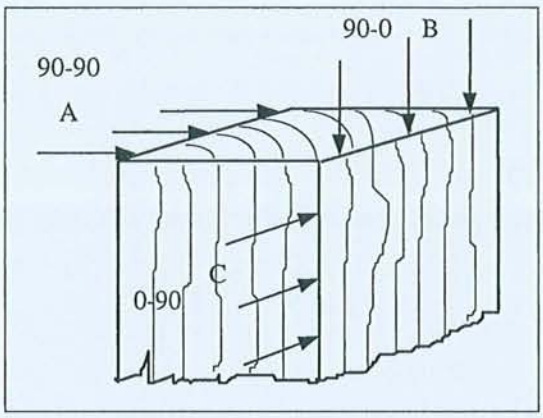


Figure 7: Principales directions de coupe.

(*) La notation des modes de coupe à base de deux nombres s'explique ainsi :

- le premier représente l'angle formé entre la direction de l'arête de coupe et le fil du bois,
- le second est celui formé entre la direction de déplacement de l'outil et le fil du bois.

La plupart des opérations d'usinage forment des copeaux. L'analyse de leur forme et de leurs dimensions nous montrent dans certains cas la cause des défauts. Les conséquences directes de l'épaisseur moyenne du copeau sont principalement la qualité de la surface engendrée et la puissance absorbée [KIV50].

Le mécanisme de formation de copeau est souvent expliqué (sauf en déroulage) par l'analyse des phénomènes de sa formation dans le ***bois massif*** avec mouvement de coupe rectiligne (direction de coupe 90-0) [MCK61].

Le premier phénomène (« **fendage** ») qui se présente dans ce type de coupe est l'apparition d'une fente lorsque l'outil pénètre la matière pour la séparer. Celle-ci se propage en avant de l'arête de coupe si l'effort normal est très important par rapport à la cohésion de la matière et si l'épaisseur de copeau est aussi d'une magnitude importante. Le résultat de ce type de copeau sont des éclats et arrachements de matière en produisant un état de surface très dégradé.

La deuxième forme de formation du copeau est par « **compression** » des fibres jusqu'à sa rupture. Ce type de copeau génère un état de surface de qualité. L'effort de coupe est alors orienté principalement dans la direction des fibres, donc avec un effort normal faible ou négatif.

Le troisième type de copeau est appelé « **flambage** ». Le flambage est la particularité d'une pièce longue et mince de se plier sous une charge axiale ; c'est à dire qui génère un copeau que ne se comprime pas. Sinon il fléchit, ce qui entraîne sa rupture. Pour qu'il se produise ce type de copeau, deux conditions sont nécessaires : il doit être très mince et l'effort normal doit être important. De cette façon le copeau se détache en avant de la dent, il se comprime, sinon il fléchit et génère un état de surface de moyenne qualité.

Dans le cas du mouvement circulaire, phénomène nous intéressant, la différence avec le mouvement rectiligne est l'épaisseur de copeau variable et la direction de l'effort de coupe changeant continuellement. Ainsi les trois étapes de la formation du copeau restent inchangées, est que le premier type de copeau généré dans la coupe à mouvement circulaire est le flambage et le dernier le fendage.

L'influence de l'épaisseur de copeau et l'angle de coupe sur la forme du copeau est donc :

Epaisseur du copeau	Angle de coupe faible	Angle de coupe élevé
faible	**Flambage**	**Fendage** (peu d'éclats)
Moyenne ou +	**Compression**	**Fendage** (éclats importants)

La formation du copeau dans les panneaux de fibres et plus particulièrement dans le ***MDF***, ne diffère pas beaucoup du bois massif, mais il faut noter quelques particularités, qui font de son usinage un cas particulier : l'orientation des fibres est relativement aléatoire et il existe une différence notable entre la cohésion des fibres des faces extérieures par rapport aux couches centrales du panneau. Ces particularités peuvent entraîner des différences pour les efforts de coupe sous une même épaisseur de copeau et de notables différences dans les états de surface résultants si l'usinage se fait à l'extérieur ou à l'intérieur du panneau.

Une zone de bonne coupe a été définie par [CHA58] en fonction de l'épaisseur du copeau et de l'angle de coupe pour le sciage dans la figure 8:

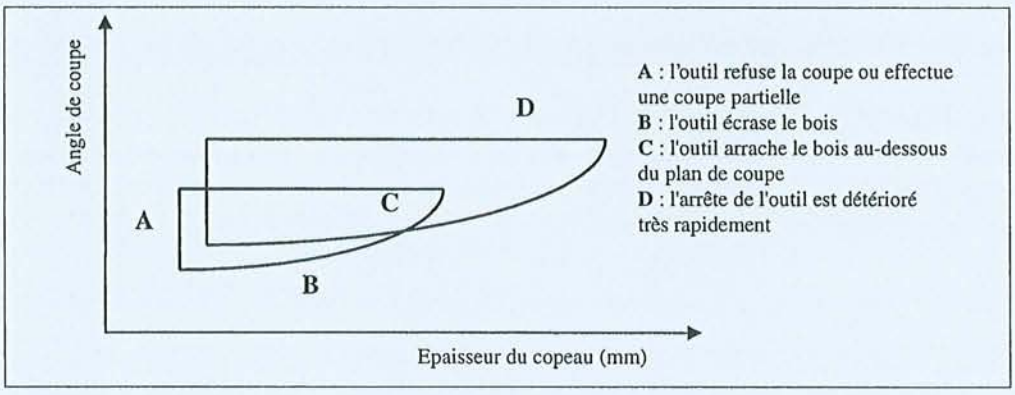


Figure 8: Les zones de bonne coupe (cas du sciage).

2.2.2. Le fraisage

Le fraisage est une opération de coupe réalisée avec un outil de révolution appelé fraise. Les fraises sont des outils dont les dents, disposés à distances angulaires égales sur la périphérie d'un solide de révolution tournant autour de son axe, attaquent successivement la pièce animée du mouvement d'avance perpendiculaire à cet axe. Ainsi, l'enlèvement de matière par l'arête de coupe, résulte de la combinaison des mouvements:

- V_c = mouvement de coupe donné par la rotation de l'outil
- V_f = mouvement d'avance de l'outil par rapport à la pièce (figure 9)

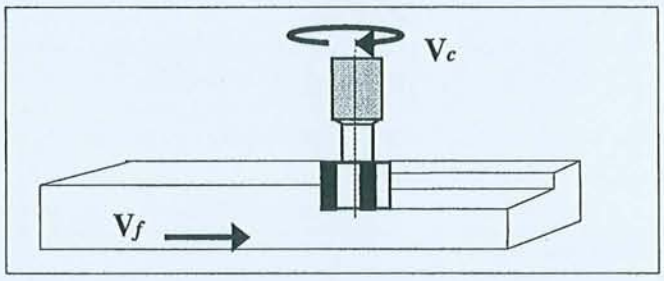


Figure 9: Les mouvements lors de la coupe.

En fonction des directions de ces deux mouvements, l'opération est réalisée soit en opposition soit en avalant. Si la rotation de la fraise se fait dans le sens indiqué par la flèche ω, le déplacement de la pièce peut se faire (figure 10) :

a) Soit dans le sens de la flèche f_1; La fraise attaque la pièce de A en B et tend à s'opposer à l'avance de celle-ci en rattrapant de ce fait les jeux du mécanisme des avances; c'est le fraisage dit en opposition.

b) Soit dans le sens de la flèche f_2; La fraise détache un copeau de B_1 en A_1 et tend à entraîner la pièce; c'est le fraisage dit en avalant.

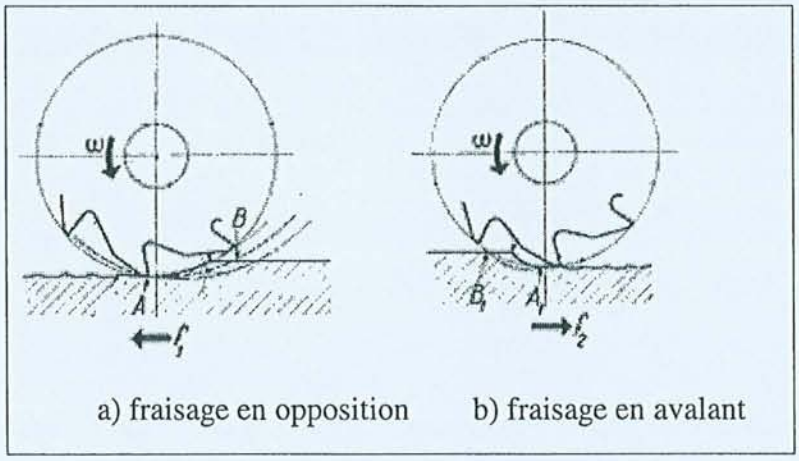


Figure 10: Les modes de fraisage.

On distingue deux types principaux de fraisage (figure 11):

- *le fraisage en bout* ou « **défonçage** » : dans laquelle l'axe de la fraise est perpendiculaire à la surface usinée, souvent fraise 2 tailles (fraisage en bout et en roulant).
- *le fraisage en roulant* ou « **rabotage** » : dans laquelle l'axe de la fraise est parallèle à la surface usinée.

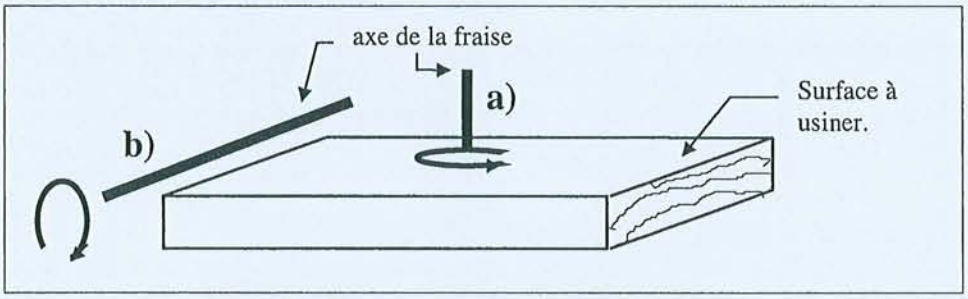


Figure 11: Les deux types principaux de fraisage.
a) en bout b) en roulant

Pour ces types de fraisage la trajectoire de chaque point de l'arête de coupe peut être assimilée à une cycloïde. Il en résulte que l'épaisseur du copeau n'est pas constant dans le temps, son évolution est différente suivant le type d'usinage:

- pour le fraisage en opposition, elle varie progressivement de zéro jusqu'à un maximum, puis retombe brusquement à zéro.
- pour le fraisage en avalant l'épaisseur du copeau varie brutalement de zéro à un maximum, puis redescend graduellement à zéro.

Donc, l'effort de coupe est variable dans le temps en direction et en intensité d'après la variation de l'épaisseur du copeau pendant la coupe, ainsi l'épaisseur moyenne du copeau est donnée par la formule:

$$ec = f_z * \sqrt{ap / D} \quad \text{(voir annexe 9.3.)} \qquad (1)$$

où: ec = l'épaisseur moyenne de copeau (mm)
f_z = avance par dent (mm)
ap = profondeur de passe (mm)
D = diamètre de l'outil (mm)

Il faut signaler que dans l'usinage du bois l'outil présente en général un faible nombre de dents donc la coupe est fortement discontinue.

2.2.3. Les efforts de coupe

Pour que la dent puisse pénétrer dans la matière et détacher un copeau, elle doit exercer un effort supérieur à la cohésion du matériau. Cet effort est la résultante de :

- la force nécessaire pour faire fléchir les fibres,
- la force de coupe par cisaillement,
- les frottements qui s'exercent sur les faces de l'outil.

Donc toutes ces forces vont être rassemblées dans l'effort de coupe, fonction des :

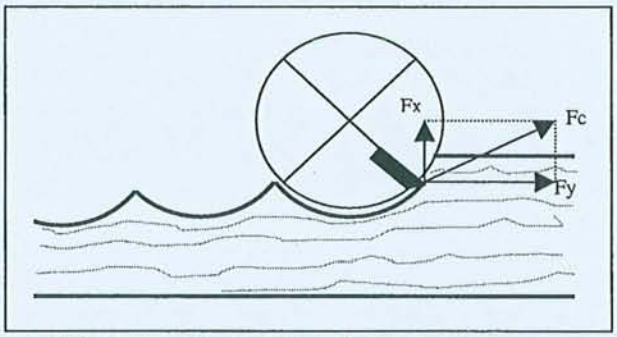
➢ paramètres liés au matériau usiné : masse volumique, nature de l'essence et humidité.

➢ facteurs liés aux conditions de travail : sens de travail par rapport aux fibres, profondeur de passe, largeur, épaisseur du copeau et vitesses de coupe et d'avance.

➢ paramètres propres à l'outil : angle de coupe, angle de dépouille, acuité de l'arête de coupe, nombre d'arêtes tranchantes et diamètre de coupe.

Décomposition de l'effort de coupe

Il est possible de décomposer l'effort de coupe F_c selon deux composantes (figure 12) : une orthogonale à la vitesse d'avance: l'effort normal Fx, l'autre suivant la vitesse d'avance V_f: l'effort tangentiel ou axial Fy . L'importance de Fx influe sur le couple que doit développer le moteur actionnant l'outil. Fy caractérise la résistance à l'avancement, donc l'effort que doit vaincre le moteur d'avance. Les efforts de coupe sont directement influencés par les facteurs inhérents au matériau et à l'outil, ainsi que par les conditions de travail.



Fc = effort de coupe
Fx = effort normal
Fy = effort tangentiel

Figure 12 : Décomposition de l'effort de coupe.

[MAR94] indique que les facteurs suivants sont importants sur les efforts de coupe :

- La densité du bois: influence fortement les efforts de coupe qui dépendent de façon linéaire de l'infra densité.
- l'humidité de bois.
- l'épaisseur de copeau, facteur le plus important ; les efforts en dépendent directement.
- les efforts de coupe sont proportionnels à la largeur de coupe et à la hauteur de coupe
- les efforts sont indépendants de la vitesse de coupe. Par contre, celle-ci conditionne la qualité de travail et le rendement de la machine.

Dans le rapport entre la géométrie de l'arête et l'effort de coupe, les lois de la coupe montrent que l'effort imposé à une dent décroît d'une façon continue quand l'angle de coupe augmente. Pour l'angle de dépouille, l'effort de coupe ne varie pas d'une façon significative [CHA68]. [KIV50] ajoute que la vitesse de coupe n'a pas une influence significative sur l'effort quand la vitesse varie entre 5 à 50 m/sec.

2.2.4. Les recherches sur les efforts de coupe en fraisage

Une étude de l'usinage des panneaux de particules et du MDF avec de hautes vitesses d'avance en évaluant les efforts de coupe a été faite par [GIT97]. Il a évalué l'effort de coupe par rapport à la vitesse d'avance et de rotation. Les résultats qu'il a trouvé montrent une tendance croissante avec la vitesse d'avance des efforts de coupe à partir d'une vitesse d'avance de 3 à 30 m/min et une diminution non linéaire des efforts lorsque la vitesse de rotation augmente. Les conclusions de cet auteur indiquent qu'une augmentation de la vitesse d'avance entraîne l'augmentation de l'épaisseur de copeau, et que ceci est le facteur le plus influent sur les efforts de coupe, comme le montre aussi [MAR94].

Le travail réalisé par [TAE96] tendant à modéliser l'effort de coupe montre que l'effort de pénétration est très utile pour mesurer l'usure de l'arête de coupe, tandis que l'effort de coupe (F_c) est celui qui nous permet d'estimer la puissance de coupe. L'influence de l'épaisseur moyenne du copeau sur l'effort de coupe dans l'usinage des feuillus a été étudiée par [SKA95]. Il a fait l'analyse suivante :

l'effort de coupe est $F_c = W_{sp} * ae * ec$ (2)

où W_{sp} = le travail spécifique de coupe en W/cm³/min
ec = l'épaisseur moyenne du copeau en mm
ae = la largeur de coupe en mm

Pour différentes épaisseurs de copeau, le travail spécifique de coupe change d'après la formule suivante:

$$W_{sp} = \frac{k_1}{ec^m} \Rightarrow Fc = k_1 * ae * ec^{1-m} \quad (3)$$

où: k_1 = travail spécifique de coupe pour ec = 1 mm,
ec = épaisseur moyenne du copeau en mm,
m = exposant qui caractérise l'intensité d'augmentation W_{sp}, dépendant du changement de l'angle entre l'arête et la direction des fibres.

L'auteur ajoute que pour calculer le travail spécifique de coupe et de cette façon l'effort de coupe, on est conditionné par différents coefficients de correction qui affectent l'épaisseur du copeau. C'est une méthode longue et peu précise. Donc on considère que le travail spécifique de coupe est proportionnel à l'épaisseur du copeau (formule 2).

Le facteur « densité du matériau bois » a une influence significative sur les efforts de coupe/puissance et sur l'état de surface résultant. Pour des auteurs comme [KIV50] et [KOC64], l'effet dû à une augmentation de la densité montre des niveaux plus élevés de l'effort de coupe total. Ces données ont été présentées dans [ZER91]. Il a mesuré les efforts de coupe dans le MDF et a déterminé son profil de densité. Cependant, comme ce matériau présente un profil variable de densité, la détermination de la constante d'essence Ke reste inconnue.

Nous utilisons la relation F = Ke * Kh * ae * (a * ec + b) [2] pour estimer l'effort de coupe [MAR94]. Nous pouvons faire la coupe du MDF en zones de différentes densités (constante d'essence Ke), donc obtenir des efforts de coupe variables. En ce cas,

- quel est le rapport entre densité du matériau et efforts de coupe / puissance ?
- Si nous faisons varier les conditions de coupe pour une épaisseur de copeau constante, de quelle qualité sera l'état de surface sur une zone de densité donnée? Que devient-il si l'épaisseur de copeau est variable ?

Un autre point d'intérêt pour la réalisation des déterminations des conditions de coupe réside dans la connaissance de la constante d'humidité (Kh). Les deux constantes qui ont été déjà étudiées pour quelques essences et panneaux, montrent cependant une méconnaissance pour le MDF.

Les paramètres qui modifient les efforts de coupe et influencent le travail des outils sont montrés dans la figure 13. Entre les points les plus importants qui influencent l'effort de coupe se trouvent le type de matériau notamment la densité ; la géométrie de la dent (l'angle de coupe) et l'épaisseur de copeau. En second lieu d'importance nous trouvons l'état de l'arête, c'est-à-dire son degré d'usure, et finalement la position de l'arête par rapport à la pièce.

Les points les plus importants à contrôler pour étudier les efforts de coupe sont donc:

- la densité du matériau
- l'angle de coupe
- l'épaisseur de copeau
- l'usure de l'arête
- le type de coupe (A, B ou C)

Nous avons fait l'étude de qualification de l'usinabilité de hêtre et de l'épicéa en mesurant les efforts de coupe, la puissance et les états de surface résultants. Nous avons travaillé avec l'épaisseur du copeau constante et avec des vitesses d'avance et de coupe variables. Les résultats trouvés (figure 14 (a) et (b)) ont été en corrélation avec la bibliographie consultée, où d'après deux niveaux différents de densité du bois, deux niveaux de profondeur de passe et deux modes de travail en opposition et avalant dans la direction de coupe B, les efforts de coupe mesurés sont proportionnels aux variations des variables, donc l'usinabilité est d'une bonne qualité d'une essence par rapport à l'autre compte tenu des niveaux assez différents des efforts de coupe mesurées avec des consommations de puissance plus importante chez le hêtre et avec des états de surface très homogènes pour les deux essences due particulièrement à l'épaisseur du copeau constante [AGU96].

[2] voir annexe 9.2.

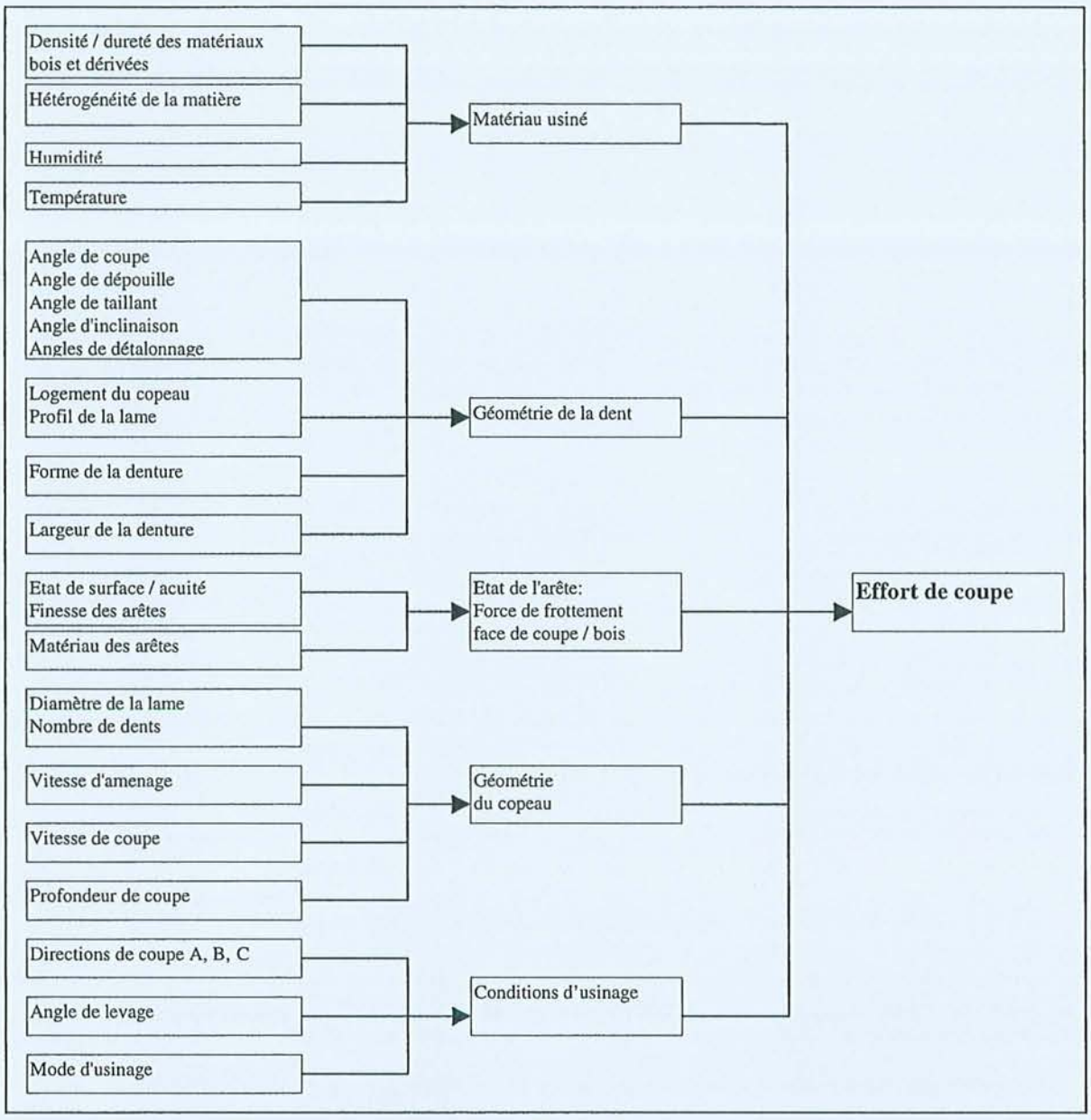


Figure 13: paramètres qui modifient les efforts de coupe et influencent le travail des outils.

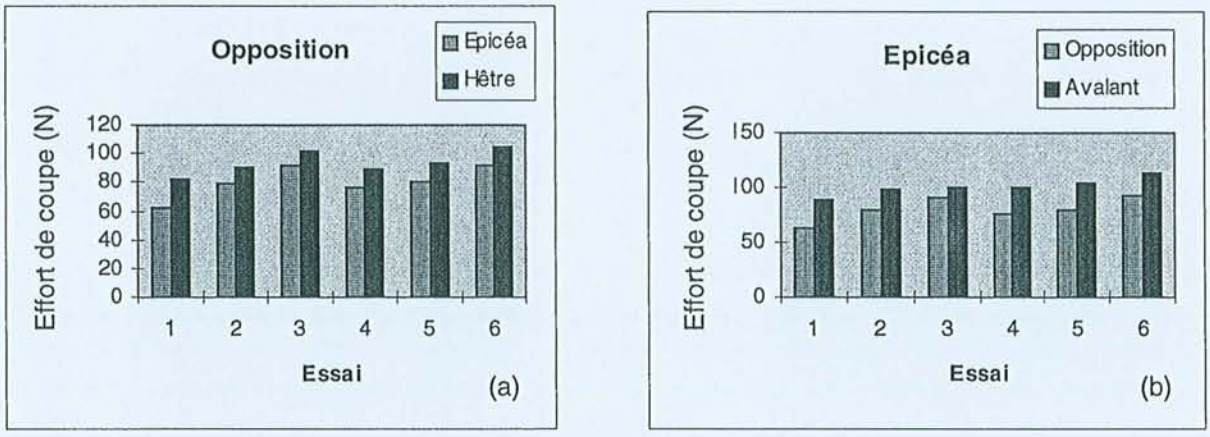


Figure 14 : Résultats des mesures des efforts de coupe dans l'épicéa et du hêtre, d'après un changement du niveau de la profondeur de passe (essais 1-3 ; 3 mm et 4-6 ; 5 mm), travail en opposition (a), et l'effet du mode d'usinage sur l'épicéa (b).

Donc, il est important de noter que l'effet densité dans nos essais a été le facteur le plus significatif par rapport à la variation des efforts de coupe, ainsi une essence comme le hêtre plus dense par rapport à l'épicéa, montre des efforts de coupe plus importants. En plus, nous avons trouvé une bonne corrélation effort – puissance - densité, donc plus la densité est forte, plus les efforts et la puissance seront importants.

D'après [WES91] l'usinage du MDF avec des vitesses de coupe de 200 m/s atteint de bonnes qualités de finition sur les chants. En plus il ajoute qu'une augmentation de la vitesse d'amenage par un facteur multiplicateur de 2 ou 4 peut réduire les coûts de production de 50 % si on fait diminuer les efforts de coupe et la charge thermique des outils.

2.2.5. L'usure des outils de coupe

La mesure de l'usure de l'arête de coupe a une grande importance dans l'usinage du bois, car l'usure progressive entraîne une augmentation de la consommation de puissance machine, de l'effort d'alimentation et de la détérioration de la surface de la pièce. Nous pouvons donc définir l'usure comme la perte de matériau de l'arête de coupe due à des facteurs mécaniques et/ou chimiques associées au processus de coupe. Les principaux facteurs ayant une influence sur l'usure de l'arête de coupe sont :

Les facteurs de coupe influençant l'usure

- la vitesse de coupe
- la géométrie de coupe et de l'outil
- la profondeur de passe
- la direction de coupe
- les efforts de coupe
- l'abrasivité du matériau
- le taux d'humidité
- la densité

Le rapport existant entre la géométrie de l'outil et l'usure explique [SHE97] que les changements de la géométrie du profil due à l'usure est plus corrélée à la performance de l'outil qu'à la quantité d'usure. Ainsi la qualité de surface et la composante normale de l'effort sont très sensibles aux changements de la géométrie du profil.

La variation de l'angle d'attaque et la profondeur de passe ont été étudiées par [STE88] qui a regardé les efforts de coupe et le recul de l'arête de coupe dans l'usinage du MDF. Il a trouvé qu'un angle d'attaque de près de 20° est optimal pour l'usinage du MDF, et qu'une diminution de l'usure est associée à une augmentation de la profondeur de passe et la durée de vie de l'arête de coupe peut être augmentée si on travaille avec une vitesse d'avance plus importante, mais il faut faire attention au fait que l'angle d'attaque et l'avance par dent peuvent augmenter jusqu'à la limite où la qualité de surface et la vie de l'outil sont détériorés.

Un autre aspect très important dans l'usure de l'arête de coupe est l'effet de la corrosion où [STE85] a étudié ce problème pour des outils de carbure de tungstène dans l'usinage du MDF, il signale que l'abrasion est le mécanisme d'usure des outils le plus important dans l'usinage du MDF et qui est dû principalement au fait d'être un matériau reconstitué et composé de colle.

Le principal problème que cet auteur a recherché a été l'effet de la haute température comme facteur de corrosion des outils. La corrosion par haute température est un facteur d'usure où les effets sur les outils est aussi dû aux adhésifs et autres matériaux ajoutés au bois, et ces matériaux sous conditions de haute température accélèrent le processus d'usure. Les résultats montrent que l'usure des outils peut être réduite si on sélectionne des matériaux qui composent les dents ou des matériaux qui composent le bois soient relativement inertes aux hautes températures.

Donc, nous pouvons conclure avec la connaissance du comportement des efforts de coupe dans le fraisage du bois, que les recherches menées dans l'usinage du bois, nous trouvons des résultats en accord avec la théorie. L'épaisseur de copeau est le facteur le plus important sur le comportement des efforts de coupe et de puissance, avec le facteur densité du matériau. Mais les résultats vont dépendre également des caractéristiques anatomiques du bois.

Comme nous connaissons théoriquement la décomposition des efforts de coupe, la question clé est de connaître son évolution pendant la coupe, pour ainsi savoir s'il y a un changement de la direction des composantes, ce qui peut nous donner des états de surface de mauvaise qualité. Une autre conséquence d'un changement de la direction des composantes peut avoir son origine dans une profondeur de passe trop importante (Fx) et une surcharge de copeau sur la dent.

Au niveau usure nos conclusions nous permettent d'identifier les facteurs suivants comme les plus importants:

* le matériau de la dent : le stellite et le carbure de tungstène présentent plus d'avantages par rapport aux autres matériaux, dû à un coût plus bas et à sa facilité d'entretien, à l'affûtage et à sa moindre fragilité.
* l'angle d'attaque : joue un rôle très important parce qu'il y a une plage optimale dans laquelle l'usure est acceptable.
* la vitesse d'avance
* la profondeur de passe
* l'abrasion due aux composantes du matériau à usiner,
* la température
* les efforts de coupe, la surveillance des directions des composantes

2.3. Les états de surface

D'après les observations menées par [LEM82], la rugosité recherchée est directement liée à la future utilisation de la pièce. Un contrôle efficace de l'état de surface du bois permet d'assurer un assemblage convenable des parties à encoller et une qualité esthétique pour les meubles.

D'autre part, [LAV95] indique que la qualité superficielle est liée aux défauts superficiels eux-mêmes liés aux caractéristiques du bois exposé à l'action des machines.

Des études menés par [CYR95] et [CYR95b] indique que la rugosité de surface augmente si l'avance par dent est augmentée, pour une condition de densité constante. Dans le cas des essences de densité différente, l'état de surface ne dépend pas seulement du niveau de densité mais aussi de son anatomie [LEB94].

D'après [LEM85] et [DEV91] la rugosité superficielle peut être utilisée comme un moyen de contrôle de la performance du processus, permettant de produire des produits finis de haute qualité qui peuvent se vendre à un prix élevé. Pour atteindre ces objectifs il est nécessaire d'avoir un système de mesure, une compréhension des causes et des effets à l'intérieur du processus de fabrication ainsi que posséder un critère de mesure de la rugosité.

2.3.1. Classification des défauts

Les défauts résultant du processus d'usinage d'une pièce mécanique peuvent être classés en deux catégories, soit quatre numéros d'ordres (Tableau 1):

1) les défauts de forme → 1ère ordre : écart de forme et de position.

2) les défauts d'état de surface, divisés en deux groupes:

- défauts macro géométriques → 2ème ordre : ondulation, ondulation périodique due aux vibrations à basses fréquences de la pièce ou de l'outil générateur.
- défauts micro géométriques → 3ème ordre : strie - sillon, ce défaut à un caractère périodique ou pseudo - périodique; → 4ème ordre : arrachement, marque d'outil, fente, piqûre. Il a un caractère apériodique. Ces deux ordres correspondant respectivement à la rugosité et à la rugosité résiduelle.

Ainsi, et d'après la norme NFE 05-015, le terme état de surface englobe:

⇨ *les écarts géométriques* d'une surface usinée par rapport à celle géométriquement idéale (défauts d'ordre 1 à 4)
⇨ *l'état physico-chimique* de la surface (nature de la couche superficielle de la pièce)

Donc les défauts du cinquième et du sixième ordre (état physico-chimique) ont une grande importance pour la capacité de la surface au collage et à l'application de teintes et vernis. On peut également classer le brûlage lié à de mauvaises conditions

de coupe (outil usé, etc.) dans cette catégorie. Nous ne considérerons par la suite que les défauts géométriques.

ORDRE	DEFINITION	ORIGINES POSSIBLES
	Défaut de forme et de position	
I	planéité, rectitude, circularité, cylindricité, parallélisme...	- qualité de la machine - défaut de bridage - déformation de la pièce, ou de l'outil en cours de travail - déformation de la pièce après usinage (libération de contraintes internes)
	Ondulation	
II	irrégularités géométriques de dimensions telles que la distance moyenne entre 2 sommets d'irrégularités soit comprise entre 0.3 et 2.5 mm	- vibrations de basse fréquence de la pièce, de l'outil ou des deux - avance par tour de fraise ($2.5 \geq f > 0.3$)
	Rugosité	
III	irrégularités géométriques de dimensions telles que la distance moyenne entre 2 pics de ces irrégularités soit comprise entre 0.02 et 0.3 mm	- trace géométrique de l'outil - avance par tour de fraise ($0.3 \geq f > 0.02$) - géométrie de l'outil
	Rugosité résiduelle	
IV	irrégularités géométriques de dimensions telles que la distance entre 2 sommets de ces irrégularités soit inférieure à 0.020 mm.	- état de surface de l'outil - vibrations haute fréquence lors de l'usinage

Tableau 1 : Définition des ordres de défauts d'usinage.

2.3.2. Critères

Remarquons que les critères de la mécanique ont été défini par rapport aux critères d'emploi des surfaces : cinématique, tenue dans le temps. Dans l'industrie du bois ces critères ne sont pas pertinents, il faut plutôt s'intéresser à des critères esthétiques ou d'adhésion de colle ou produits de finition.

[MAR83], [LAM85] et [LEB94] indiquent en reprenant la norme NF E 05 015 que les critères d'états de surface peuvent se séparer en deux grandes classes:

* les critères physiques et
* les critères statistiques (figure 15).

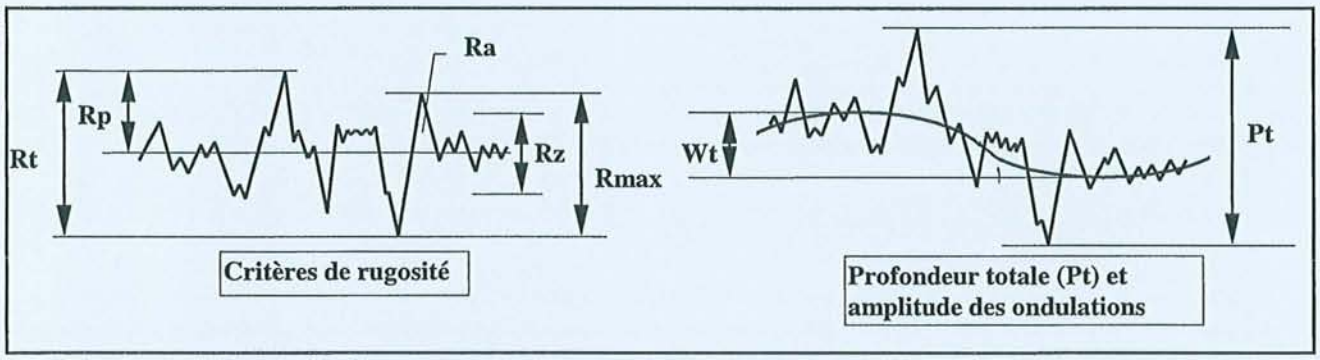


Figure 15 : Critères d'état de surface.

Critères physiques: Les critères physiques sont directement déduits des caractéristiques géométriques du profil. Selon le type de profil total mesuré, de profil d'ondulation ou de rugosité il peut être distingué les critères physiques suivants:

- *Profondeur totale* : distance entre le point le plus haut des saillies et le point le plus bas des creux;
- *Profondeur moyenne* : moyenne des distances saillie - creux;
- *Profondeur maximale* : maximum des distances saillie - creux;
- *Pas moyen* : moyenne des distances saillie - saillie.

Critères statistiques: Les critères statistiques sont déduits des caractéristiques du profil. D'après [MAR83], [LEB94] et [RIC95], les critères statistiques sont fonction de la longueur d'évaluation ainsi que de la ligne moyenne des profils. Les définitions des critères statistiques sont:

- *Taux de portance ou pourcentage portant* : rapport entre la longueur portante dans une profondeur de coupe donnée et la longueur d'exploration
- *Profondeur d'aplanissement* : distance entre le point le plus haut des saillies et la ligne moyenne
- *Ecart moyen arithmétique* : moyenne des ordonnées définies à partir de la ligne moyenne du profil, ordonnées exprimées en valeur absolue.

2.3.3. Méthodes de mesure

Les méthodes de mesure des états de surface sont nombreuses et ont été décrites par un grand nombre d'auteurs. Il peut cependant être cité les mesures visuelles et tactiles, les méthodes par palpage (*stylus*), la mesure par laser, la mesure par vision. Une autre méthode développée par [TAN91], [ZHA91] et [ZHA92] correspond à l'estimation de la qualité de finition superficielle par émission de signaux acoustique. [LEM82] et [LEM85] mentionnent d'autres techniques telles que la mesure directe par microscope traditionnel ou électronique, la détermination d'un facteur de rugosité par la mesure de quantité d'air qui s'échappe entre une surface rugueuse et une surface de référence lisse, la détermination d'un facteur de rugosité lié à l'angle de réflexion d'un rayon de lumière. Plusieurs de ces auteurs ont mené une étude comparative entre les méthodes par palpage et les méthodes plus évoluées (laser, vision).

[GRO96] a développé un nouveau capteur pour faire la mesure de l'état de surface et pour mesurer des qualités de surface. Il s'agit de la caractérisation des surfaces par analyse du frottement (TOPOSURF@) dont le critère d'état de surface repose sur une approche énergétique. Un autre capteur développé par le même auteur est un système qui caractérise les états de surface par vision artificielle (TOPOVISE@). Il fait une analyse par caméra de la lumière rasante obtenue par laser sur la surface à analyser. Ce dernier sera utilisé pour qualifier les surfaces usinées (voir chapitre 4.1. Matériel, page 53-54).

2.3.4. Facteurs inhérents au bois

D'après [LAV95] les conditions de croissance des conifères influent sur l'état de surface après usinage. Par exemple un climat et un sol qui favorisent une croissance rapide, forment un bois de densité faible et variable. Dans ce cas, ces bois conduiront à des produits de faible valeur ajoutée et la production de planches avec un état de surface de bonne qualité sera problématique.

D'autre part [HEC95] indique les facteurs suivants comme prépondérants sur la rugosité de placages de douglas: la largeur de cernes, la densité de bois, l'angle des cernes dans le placage, les conditions de stockage et la préparation du bois avant la production. Il ajoute que la qualité de surface des placages est en étroite relation avec la structure interne du bois. Ainsi des rondins de douglas à larges cernes conduiront à des placages d'un meilleur état de surface. Par contre, si on considère le bois scié, la tendance sera inversée: un meilleur état de surface sera obtenu à partir de bois à faibles largeurs de cernes.

[TAN91] a étudié, le rapport entre l'état de surface et le taux d'émission acoustique pour les scies circulaires. Il indique comme facteurs importants, qui déterminent la qualité superficielle:

* la vitesse d'avance, qui est liée à l'état de surface par une relation linéaire positive (cette relation est extrêmement dépendante de l'espèce);

* la densité du bois; dans cet article l'auteur concluait que le degré de qualité superficielle, dans le cas des conifères et des feuillus à zone initiale poreuse,

diminue avec la densité, ce qui s'explique puisque quand la densité est faible, les lumens des cellules ont de grands diamètres, donc une résistance mécanique faible ce qui facilite la coupe. Dans le cas des bois à pores diffus, un changement de densité n'affecte pas la qualité.

[HIZ96] a fait l'analyse de la rugosité de surface sur MDF et des panneaux des particules avec la méthode *stylus*. Il a travaillé avec trois paramètres pour évaluer le rugosité de surface: la rugosité moyenne (R_a), la hauteur moyenne saillie - creux (R_z) et la hauteur maximale saillie - creux (R_{max}).

Il conclu que la méthode *stylus* peut être utilisé pour quantifier la rugosité de surface dans les panneaux MDF. Il trouve que la densité a un effet très importante sur la rugosité superficielle chez les panneaux de particules, par contre cette relation n'est pas si claire chez le MDF. En plus les panneaux de particules montrent une meilleure stabilité de surface par rapport au MDF.

2.3.5. Facteurs liés au processus

Les observations faites par [USE75], indiquent que la qualité de surface est affectée par le temps d'usinage de l'outil; l'état de surface sera de meilleure qualité après 1 heure à 1 heure 30 de coupe. Ceci serait dû au fait qu'après affûtage les arêtes vives des dents rayent la surface du bois.

[MAR83] et [RIC95] indiquent que la texture superficielle peut être classifiée suivant trois degrés:

1er degré : structure anatomique
2ème degré : texture résultante du processus d'usinage
3ème degré : texture résultante de la variation au cours du processus d'usinage (vibrations, mauvais alignement, couteaux et outils usés).

Ainsi, de par l'hétérogénéité de la matière au sein d'une même espèce et pour des espèces différentes, la texture superficielle ne sera pas seulement déterminée par la structure morphologique du bois. De plus [BEN73] indique que les facteurs qui influent sur la rugosité sont: les vibrations de la machine, la stabilité de l'outil, l'usure de l'arête de coupe et la puissance consommée. [LEM82] ajoute à ces facteurs, les déformations de l'outil de coupe liées aux efforts de coupe, la géométrie de l'outil de coupe, l'échauffement de l'outil pendant la coupe.

[DEV91] indique que l'avance par dent a une grande influence sur la rugosité superficielle (si elle augmente, la surface se retrouve plus rugueuse et vice-versa). De plus une petite avance par dent peut avoir un effet bénéfique sur la précision dimensionnelle et sur le profil de rugosité, cependant sous ces conditions la puissance consommée augmentera.

En étudiant les paramètres du processus d'usinage qui influencent la qualité superficielle du chêne rouge, [JER93] a trouvé comme significatif l'angle de coupe, la vitesse d'avance, le taux d'humidité et la hauteur de coupe. Dans un premier temps ces auteurs ont montré qu'un angle de coupe de 0° n'occasionne pas de changements significatifs dans la finition superficielle lorsque la vitesse d'avance

varie entre 9 et 29 m/mn. Ensuite il ajoute que la qualité superficielle, atteinte pour une hauteur de coupe et une vitesse d'avance données, est dépendante de l'angle de coupe qui a été choisi.

[LAV95] conclut que pour une vitesse d'avance réduite, l'état de surface d'un bois raboté sera meilleur que celui obtenu pour une vitesse d'avance élevée. De plus le Centre Technique du Bois et de l'Ameublement [CTB91] indique comme conclusions de l'enquête auprès des industriels en matière d'augmentation de la vitesse de coupe, celle-ci est liée avec une augmentation de la vitesse d'avance et il en résulte un accroissement de la qualité des surfaces sciées.

[LEB96] conclut dans son mémoire que les trois causes essentielles des défauts d'usinage sont dues à:

- problèmes de maintien en position
- problèmes de vibrations en cours d'usinage
- problèmes de libération de contraintes internes pendant et après usinage.

2.4. L'outil de coupe

Ce chapitre fait une brève description de l'outil de coupe, en terme de géométrie et de matériaux de coupe.

2.4.1. La géométrie de coupe

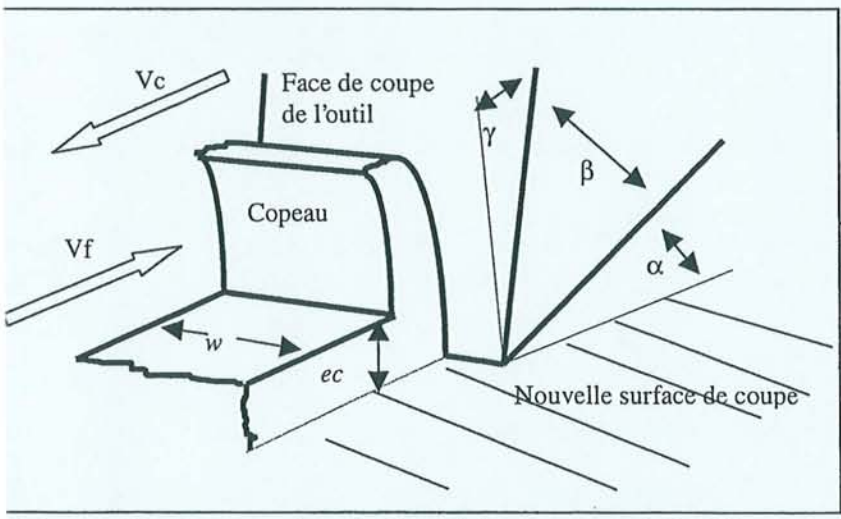
La coupe est un processus technologique dont se libère, par l'action d'un instrument coupant, une couche déterminée, avec l'objectif d'obtenir une pièce d'une forme, dimension établie et qualité. Les caractéristiques de l'outil de coupe sont d'avoir un ou plusieurs éléments coupants, qui sont attachées par liaison mécanique ou liaison «physico-chimique » ou font partie du corps de l'outil. Ils sont décrits en paramètres angulaires et dimensionnelles. L'élément de coupe a une forme de coin qui termine en un tranchant et permet par ses caractéristiques de séparer les fibres du bois, formant d'une part des nouvelles surfaces et d'autre part détachant des copeaux.

La coupe est aussi l'application d'énergie qui permet de diviser la pièce de bois en produisant une nouvelle surface interne. Elle doit ainsi : 1) maintenir les ruptures dans des limites acceptables, et, 2) maximiser surtout l'efficience [MCK67]

Géométrie des outils

- corps de l'outil: c'est le support des dents de l'outil, il est monobloc avec les dents et dans la même matière que celles-ci, il est aussi réalisé en acier mi dur sur lequel sont rapportés les dents en matière très dure.

- caractéristiques angulaires: on trouve les angles suivants (figure 16)
  - angle de coupe γ
  - angle de taillant β $\qquad \alpha + \beta + \gamma = 90°$
  - angle de dépouille α



Nomenclature:
- α angle de dépouille; entre le dos de l'outil et la surface de travail entre l'outil
- γ angle de coupe; entre la face de l'outil et le plan perpendiculaire à la direction d'avance
- ec épaisseur de copeau; avant d'être détaché de la pièce
- *w* largeur de copeau; avant déformation
- Vc ; vitesse de coupe
- Vf ; vitesse d'avance

Figure 16 : Les angles de l'outil de coupe [KOC64].

Ainsi nous avons:

- **l'angle de coupe (γ)** : ou angle d'attaque, c'est l'angle le plus important dans l'outil, de lui dépendent en grand partie la qualité du travail exécuté et la puissance nécessaire. L'effort de coupe décroît en même temps que l'angle d'attaque augmente jusqu'à ce que cet angle ait une valeur d'environ 45° (figure 17). Un angle de 20 à 25° est utilisé dans le cas du fraisage du MDF.

- **l'angle de dépouille (α)** : Cet angle est sans grande influence sur les efforts de coupe dans la limite où il évite le talonnage de l'outil et n'affaiblit pas l'angle de taillant. Les angles de dépouille sont compris entre 7 et 25° où un angle de 15° est souvent utilisé dans l'usinage du MDF.

- **l'angle de taillant (β)** : Cet angle conditionne la résistance mécanique et la flexibilité du bec de l'outil. Les outils ayant des angles de taillent trop petits se détériorent très rapidement. Dans le but d'éviter une détérioration trop rapide de la partie active et une qualité de travail médiocre, la valeur de l'angle de taillant ne doit pas être en dessous d'une valeur critique. Cette valeur dépend du matériau travaillé, de la constitution de l'outil, de l'épaisseur du copeau et de la direction de coupe. La valeur critique se situe entre 35 et 45° pour les directions A et B et jusqu'à 20° dans la direction C.

- **les angles de détalonnage**: tant que ces angles sont petits ils n'influencent que très peu les efforts de coupe. Ils doivent empêcher le talonnage de l'outil même après une usure importante surtout pour les scies circulaires.

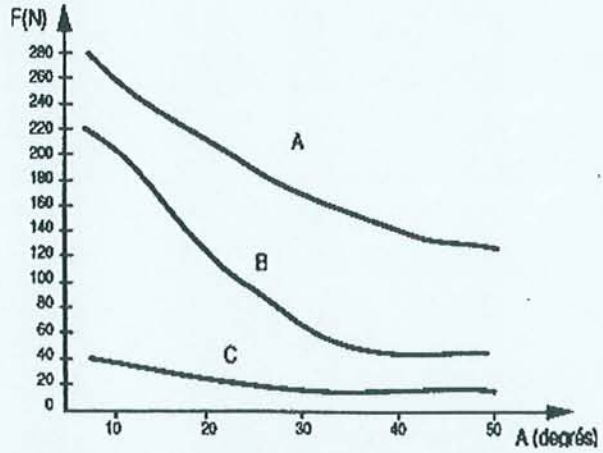


Figure 17 : Influence de l'angle d'attaque sur les efforts de coupe suivant les directions de coupe A, B, C (cas du hêtre à 12% d'humidité, copeau de 0,2 mm d'épaisseur, outil usé à 50%).

2.4.2. Les matériaux de coupe

Les aciers et les stellites permettent l'obtention d'arêtes très vives, ces outils nécessitent un minimum de puissance, et ils assurent un bon travail avec des vitesses de coupe moyennes (30 à 50 m/s). Par contre, les carbures de tungstène ne permettent pas la réalisation d'arêtes très fines et en plus ils nécessitent une puissance plus importante, ils doivent tourner plus vite pour assurer un bon travail (70 à 100 m/s) mais ils s'usent moins vite.

Le matériau de coupe modifie le coefficient de frottement entre les arêtes tranchantes de la dent et le bois. Une variation de la force de frottement engendre une modification de la direction de l'effort de coupe.

Certains matériaux permettent l'obtention d'arêtes très vives, donc les outils fabriqués avec ces matériaux nécessitent un minimum de puissance, ainsi on distingue les matériaux suivants:

- aciers rapides
- alliages chrome - cobalt ⇒ stellites
- carbure de tungstène (nuances K01,.....K30, K40, K50)
- diamant

[SAL85] a étudié l'usure des dents dans le rabotage des bois tropicaux, il a travaillé avec différents types d'outils:

- acier rapide
- stellite
- carbure tungstène

Il conclu que l'acier rapide a une durée de vie insuffisante et des mauvais taux de profit par rapport aux autres types de métaux. Le HSS est plus cher que le Stellite et le carbure, mais ils sont plus faciles à affûter et moins fragile. En plus l'entretien est plus facile pour le Stellite et il n'y a pas besoin d'une machine spéciale pour l'affûtage et il n'y a pas non plus de problème pour faire les réparations sur le Stellite.

La figure 18 nous montre clairement que le carbure est le matériau qui nous permet d'usiner jusqu'à 800 m du bois (Western Red Cedar) sans avoir un recul de l'arête significatif et bien que l'usure apparaisse après les 800 m, le recul de l'arête va à être toujours inférieur à celui du stellite et des autres matériaux tels que l'acier rapide, l'acier au chrome et l'acier chromisé.

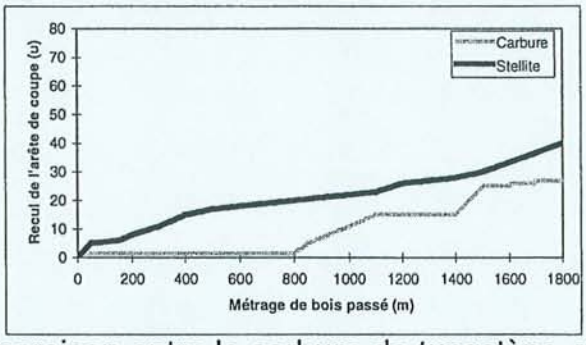


Figure 18: Comparaison entre le carbure de tungstène et le stellite, le recul de l'arête de coupe (μ) d'après le métrage de bois passé (m) [DRE86].

2.4.2.1. Aciers rapides

Ce matériau se caractérise pour être utilisé dans la confection des outils, en constituant leur corps. S'il fait partie de la partie tranchante, on doit utiliser des aciers au chrome, des aciers rapides ou des aciers surcarburés. Les principaux avantages sont : 1. Sa finesse de l'arête qui donne un très bon pouvoir tranchant ; 2. Est facile à entretenir ; 3. Bonne résistance aux chocs ; 4. Le prix. Cependant, le grand problème est leur résistance mécanique, très altérée pour les changements de température. Ainsi, l'usure mécanique se manifeste, et en plus à cause de ses bonnes capacités de conduction électrique, la corrosion physico-chimique contribue à rendre plus faible sa résistance à l'usure.

2.4.2.2. Les alliages chrome – cobalt (stellite, tantung)

Le stellite présente comme caractéristique principale de conserver ses propriétés mécaniques à haute température. C'est un matériau fortement résistant à la corrosion, donc que présentant une bonne résistance à l'usure. Ses principales utilisations se trouvent dans le sciage avec lames de scie à ruban. Pour l'usinage du bois et plus particulièrement du toupillage on utilise un autre alliage chrome - cobalt, le tantung. De même que pour le stellite, ce matériau conserve très bien ses propriétés mécaniques jusqu'à des températures de plus de 700° (sa dureté). Pour ces deux alliages, les principales caractéristiques sont une bonne résistance à l'usure et la qualité de l'arête de coupe.

2.4.2.3. Les carbures de tungstène

Cet matériau est caractérisé en premier lieu par la manière avec laquelle se réalise sa fabrication. Au contraire des autres matériaux, c'est un métal fritté, c'est à dire que les éléments que le composent sont juxtaposés les uns aux autres. Ces éléments sont les grains de carbure de tungstène et le cobalt, sert de liant. La cohésion entre eux se réalise par pressions et températures élevées.

Une autre caractéristique importante de cet matériau est sa dureté assez élevée par rapport aux matériaux classiques, sa résistance à l'abrasion et son module d'élasticité.

Les compositions les plus utilisées pour ce matériau sont:

- 97 % de carbure de tungstène et 3 % de cobalt. Avec ces proportions, la dureté est grande mais la résistance est faible.
- 94 % de carbure de tungstène et 6 % de cobalt, porcurent une résistance moyenne.
- 88 % de carbure de tungstène et 12 % de cobalt. La dureté est moyenne et la résistance aux chocs et à l'usure est bonne.

Son utilisation se trouve sous la forme de pastilles rapportées. Il est particulièrement utilisé dans l'usinage des bois abrasifs mais aussi dans l'usinage de tous types de bois. Cependant, dans le cas de bois trop tendres, il peut se produire des arrachements de fibres dûs à une arête pas assez fine.

Les qualités des carbures utilisés pour les outils à bois d'après la société Leuco sont montres dans le tableau suivant:

Désignation du matériau	Densité	Dureté	Résistance à la flexion	Module d'élasticité
ISO	(gr/cm³)	(HV10)	(N/mm)	(N/mm) * 10000
K 01	15,10	1850	1400	66,5
K 05	14,85	1750	1600	64,5
K 05	15,10	1700	1800	66,5
K 10	14,85	1650	1800	64,5
K 20	14,85	1600	1850	64,5
K 30	14,70	1500	2200	63,0
K 40	14,55	1400	2400	61,5

Tableau 2 : Les qualités des carbures pour les outils à bois [DRE86].

2.4.2.4. Le diamant

Ce matériau, en particulier le diamant polycristallin présente d'excellents résultats dans l'usinage où le carbure a des problèmes, comme dans le cas de l'usinage de bois très durs ou des panneaux revêtus, c'est à dire, tous les matériaux qui usent le plus les outils.

Leur principal avantage est la diminution des temps morts, parce que l'on estime qu'entre deux réaffûtages, l'outil diamant dure 300 fois plus qu'un outil carbure. Le problème majeur est sa fragilité aux chocs. Donc pour limiter les risques de rupture, les outils ont un angle de taillant important, compris entre 65 à 70°, et les angles d'attaque doivent être inférieures à 15°. A cause de ce problème de fragilité, les machines doivent être bien réglées et les vibrations minimisées. D'autres problèmes sont leur entretien et affûtage : compliqué et cher, avec un coût d'achat de l'outil élevé.

Entre ses avantages nous trouvons que:

- l'usure est plus lente
- l'usure est uniformément répartie
- sa dureté et sa résistance à l'abrasion sont réparties dans toutes les directions
- le diamant est insensible aux acides dégagés par certaines essences et qui attaquent le carbure
- possibilité de supporter plusieurs affûtages, en dépendant de l'épaisseur de polycristallin sur la plaquette.

2.5. Facteurs généraux influençant le travail de l'outil

Pour un bon fonctionnement, l'outil doit présenter idéalement, les caractéristiques suivantes:

Caractéristiques générales de l'outil

* bonne qualité de coupe, tant en ce qui concerne l'état de surface résultant et la précision de coupe
* longue durée d'utilisation
* grande facilité d'affûtage
* possibilité de montage et démontage rapide et facile
* bonne conservation de profil pendant le plus grand nombre d'affûtages
* bonne évacuation des copeaux
* consommation d'énergie minimale
* ne pas être dangereux
* posséder un logement de copeau devant la dent suffisant pour des vitesses d'avance maximales
* ne pas provoquer d'échauffement anormal du bois
* ne pas adhérer aux résines dégagées par certaines matériaux.

En plus il faut noter les facteurs qui ont une influence sur le travail de l'outil, facteurs liés au matériau à usiner, à l'outil et au mode de travail.

Facteurs d'influence sur le travail de l'outil :

a) facteurs associés au matériau :
* la densité et la dureté du bois
* l'abrasivité (cause principale d'usure)
* l'humidité, en général, elle abaisse les efforts de coupe et diminue l'usure
* hétérogénéité de la matière
* directions de coupe, les efforts de coupe varient de 1 à 4 suivant la direction de travail
* température.

b) facteurs liés à l'outil sont :
* la géométrie de la dent
* l'état de surface de la face d'attaque et finesse de l'arête
* matière de l'outil
* diamètre de l'outil et nombre d'arêtes de coupe
* saillie de l'arête de coupe par rapport au porte - outil
* face déflectrice du contre - fer et logement de copeau

c) facteurs liés au mode de travail :
* épaisseur et largeur du copeau
* angle entre l'arête de coupe et la direction des fibres
* profondeur de coupe
* mouvement relatif du bois par rapport à l'outil
* vitesse de coupe.

Pour les usinages présentant des problèmes, on trouve principalement l'usinage des panneaux des fibres, et entre autres les nouveaux matériaux de coupe tels que le

diamant et la céramique, mal adaptés au travail sur ce type de panneau. Les meilleurs résultats sont obtenus avec le carbure de tungstène.

2.6. L'usinage du MDF

Les recherches développés dans l'usinage essentiellement du MDF sont nombreuses, nous pouvons citer un auteur comme Stewart [STE88], qui a beaucoup travaillé en recherchant les problèmes d'usure de l'arête de coupe dans l'usinage de MDF. Par la mesure des efforts de coupe et du recul de l'arête il a cherché la géométrie optimale de coupe. Il indique que le rapport entre ces deux paramètres et la longueur de coupe est très utile pour sélectionner l'angle de coupe optimal.

Ce même auteur a aussi trouvé qu'il existe un rapport entre la décharge électrique qui se produit pendant la coupe de MDF et l'usure de l'arête [STE93][STE97]. Ainsi, plus l'arête est dégradée, plus importante est la quantité des copeaux qui touche la face de dépouille, le résultat est une augmentation du nombre et de l'amplitude des pics de tension. Il se produit donc une décharge électrique très forte signe de l'augmentation de l'usure, qui est de plus accentuée si l'outil est de type acier [KIN95].

Des recherches tendant à observer le comportement des nouveaux matériaux de coupe dans l'usinage des panneaux des particules et de MDF ont été faites par [GIT97]. Il a travaillé avec des outils PCD et hautes vitesses d'avance. Son objectif principal a été de reconnaître les problèmes de développement de la technologie d'usinage avec machines CNC, et de comprendre d'une façon plus précise les efforts auxquels sont soumis les outils et machines.

L'étude menée par [ZER91] a eu pour objectif de déterminer les conditions de coupe optimales dans l'usinage du MDF, sans prendre en compte le COM. Il s'est fixé comme méthodologie de faire l'analyse et le comportement de l'interaction entre l'outil, le matériau à usiner et l'emploi, donc, on peut dire le couple outil - matière et son emploi.

Il a choisi pour faire ses essais de faire varier v*f*, ap, V*c*, l'humidité, le mode de coupe et le type d'outil. Comme indicateurs de l'usinage il a travaillé avec les efforts de coupe, la puissance et l'usure de l'outil. Ensuite il a fait l'analyse des surfaces par trois méthodes différentes, pour finalement avec ces données faire l'analyse de l'aptitude à l'emploi avec un modèle de mouillabilité.

Il conclut qu'essentiellement l'épaisseur du copeau et le mode de coupe sont les facteurs les plus importants sur la qualité des surfaces engendrées. Il a joué avec les paramètres de coupe dans un faible amplitude, il a pu montrer l'importance de l'épaisseur du copeau sur les efforts de coupe. Donc, on peut conclure qu'il a fait une analyse approfondie sur l'usinabilité du MDF et bien qu'il confirme les lois de la coupe, l'évolution des types de copeaux, l'évolution des efforts de coupe et de la puissance d'après une épaisseur de copeau donnée, on ne trouve pas un domaine de validité où ces conditions soient optimisées due à la faible amplitude choisie au départ de son étude.

Dans des autres études menées dans l'usinage du MDF, nous pouvons citer [KO99] qui a étudié l'usinage orthogonal du MDF en mesurant les efforts de coupe, l'état de surface de la pièce et les mécanismes d'usure de l'arête de coupe. Cet auteur a trouvé une corrélation entre la vitesse de coupe et l'avance avec les efforts de coupe et le recul de l'arête pour différents angles de coupe et matériaux qui composent celle-ci.

Il est important de noter que les résultats trouvés dans cette étude nous permettent d'apprécier l'importance de la variation de la densité dans le profil du MDF sur les comportements des efforts de coupe, qui vont montrer une chute rapide lorsque l'usinage se rapproche des couches internes du panneau. Donc, l'estimation des efforts de coupe et de l'état de surface se complique, notamment lorsque la coupe se réalise sur une partie du chant.

D'autre part [GON99] a recherché les performances dans la coupe orthogonale du MDF pour une opération de défonçage. Il a évalué l'influence de la profondeur de passe, de l'angle de coupe et de la largeur de coupe pour identifier quel niveau de ces trois paramètres montrent un meilleur comportement lors de la coupe. Le critère le permettant de faire son évaluation a été l'effort parallèle de coupe (Fy). De même que l'auteur précédent, les résultats ont montré l'importance de l'hétérogénéité du profil de densité du MDF dans la coupe, ainsi, en faisant augmenter la profondeur de coupe, il a trouvé une diminution de la valeur des efforts de coupe, pouvant expliquer ceci par la plus faible densité du matériau à l'intérieur du panneau.

UNIVERSITÉ NANCY 1 BIBLIOTHÈQUE SCIENCES

III. LE COUPLE OUTIL – MATIERE (C.O.M.)

3.1. Généralités.

3.2. Travaux antérieurs.

3.3. L'approche par le COM.

3.4. Description.

3.5. Les travaux sur le COM dans le domaine des métaux.

3.6. L'usinage du bois et COM.

3.7. Conclusions.

III. LE COUPLE OUTIL - MATIERE (C.O.M.)

3.1. Généralités

Dans le domaine de l'usinage du bois, l'usinage par enlèvement de copeaux est l'opération la plus importante. On trouve de nombreuses variables qui ont une importance fondamentale au niveau de la finition du produit. Le déclassement de la pièce ou la nécessité d'un nouveau passage par la machine a pour résultat soit une perte de productivité (moins de pièces produites dans la même unité de temps) soit une perte de matière première.

De ce fait, on introduit le concept "*Couple outil - matière*" (C.O.M.) appliqué souvent dans l'industrie mécanique. Il s'agit là de produire en diminuant les délais et les coûts et en augmentant la qualité. Mais ceci ne suffit plus pour persister sur le marché aujourd'hui. Il faut de nos jours "faire bon du premier coup" tout en "maîtrisant les procédés" et en "pré dimensionnant le système de production".

L'importance des conditions de coupe est sensible à plusieurs niveaux :

- au niveau du bris d'outils, ceci est un problème souvent lié à une variation brutale des conditions d'usinage, comme par exemple une prise de matière trop importante, la non - fragmentation du copeau, etc,
- dans la recherche des bonnes conditions d'usinage et la manipulation des potentiomètres sur les CNC. 20 % du temps opérationnel est perdu en moyenne,
- par des conditions de coupe mal réglées ou par un mauvais choix de l'outil, on peut perdre 10 à 30 % des budgets outils.

Ainsi, nous pouvons envisager les objectifs suivants :

- l'augmentation de la productivité,
- l'amélioration de la qualité et la régularité des qualités obtenues,
- la régularité des temps de fabrication (pas de bris d'outils, pas de modifications des paramètres de coupe),
- l'augmentation de la durée de vie des outils,
- éviter la surcharge des machines.

Comment réalise-t-on l'optimisation des conditions de coupe ?

- Si l'outil est sélectionné en considérant les conditions de coupe données, il faut connaître les caractéristiques de la machine, de la matière et du type d'usinage.

- Si la sélection des conditions de coupe se fait en fonction des données COM, on peut alors optimiser les vitesses de coupe et d'avance en fonction de la quantité de matière enlevée, de la profondeur de passe et de la largeur de coupe.

3.2. Travaux antérieurs

Des recherches ont été entreprises depuis de nombreuses années sur la détermination des conditions optimales de coupe. Nous pouvons citer [MAR80] qui a étudié un système d'optimisation d'une opération de tournage avec mesure de l'usure de l'outil. Cet auteur indique que la connaissance des contraintes limitant le domaine des variables d'action est importante lors de la détermination des conditions optimales de coupe, car les meilleures conditions se situent généralement sur l'une d'entre elles.

Ces contraintes peuvent être exprimées par des droites dans un système logarithmique fonction de la vitesse de coupe et de l'avance par dent (figure 19).

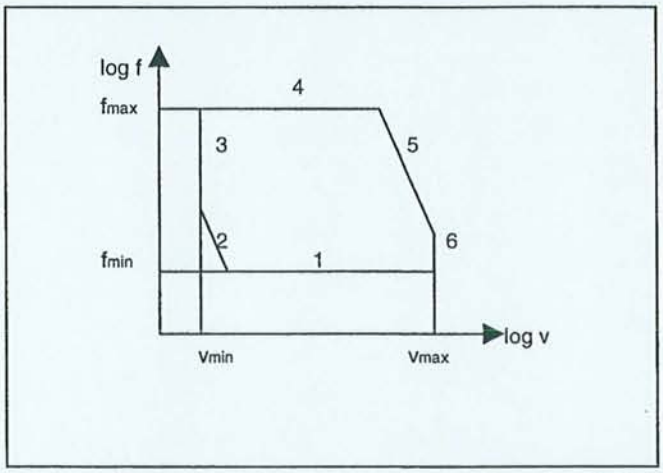


Figure 19 : Domaine des contraintes d'après [MAR80].

Donc, il définisse ces contraintes comme :

- Contrainte 1 : f minimum (machine, copeau minimum),
- Contrainte 2 : limite de formation d'une arête rapportée,
- Contrainte 3 : vitesse de coupe minimum,
- Contrainte 4 : f maximum, limite inférieure des contraintes correspondant à l'avance maximum,
- Contrainte 5 : contrainte de puissance,
- Contrainte 6 : vitesse de coupe maximum (machine-outil,effondrement d'arête).

Ainsi, cet auteur a pu montrer que, malgré le caractère aléatoire de la majorité de ces contraintes rendant leur évaluation difficile, il est possible d'établir une zone de travail de l'outil (sous contraintes) qui maximise la durée de vie de celui-ci. Donc, nous trouvons dans cette étude les premiers fondements de l'idée du COM.

D'autre part, en prenant en compte les normes [AFN94], [AFN95] et [AFN95b], nous pouvons définir un couple outil matière comme les données techniques qui permettent le choix et la détermination des conditions d'utilisation d'un outil coupant pour une opération définie, ainsi que le mode d'obtention de ces données. Donc, le couple outil - matière (COM) permet de définir quelles seront les conditions de travail de la machine pour atteindre une zone de fonctionnement au niveau outil - bois. Leur importance se trouve dans le fait que si on connaît les limitations et capacités d'une machine et son outil pour usiner un produit bois donné, on pourra optimiser le débit sans surpasser les limites optimales de coupe.

3.3. L'approche par le COM

Les buts du COM [AFN95b] sont en général de permettre de choisir "le bon outil au bon moment"; et de déterminer le domaine d'emploi d'un outil dans une matière donnée. La méthodologie COM permet de déterminer le domaine d'utilisation par des essais (ce domaine est appelé le COM), d'extrapoler les résultats d'un COM pour un autre COM, de diminuer les temps d'industrialisation des pièces et de diminuer les temps de développement de nouveaux outils. Le COM a deux objectifs: 1) il doit être rapide et simple à obtenir et à utiliser; 2) il doit être suffisamment précis pour être utilisable en recherche et développement [BAG96].

L'idée du couple outil - matière doit représenter un outil défini qui exécute une opération donnée dans une matière définie sous des modes précisés. Le COM est un ensemble de points de fonctionnement. Un point de fonctionnement est un jeu de paramètres géométriques et technologiques qui respectent les règles d'hygiène et de sécurité, les règles de l'art, la formation du copeau et une dégradation convenable de l'arête de coupe [LEV96].

Une fois établi, le COM permet de choisir un outil selon le schéma de la figure 20.

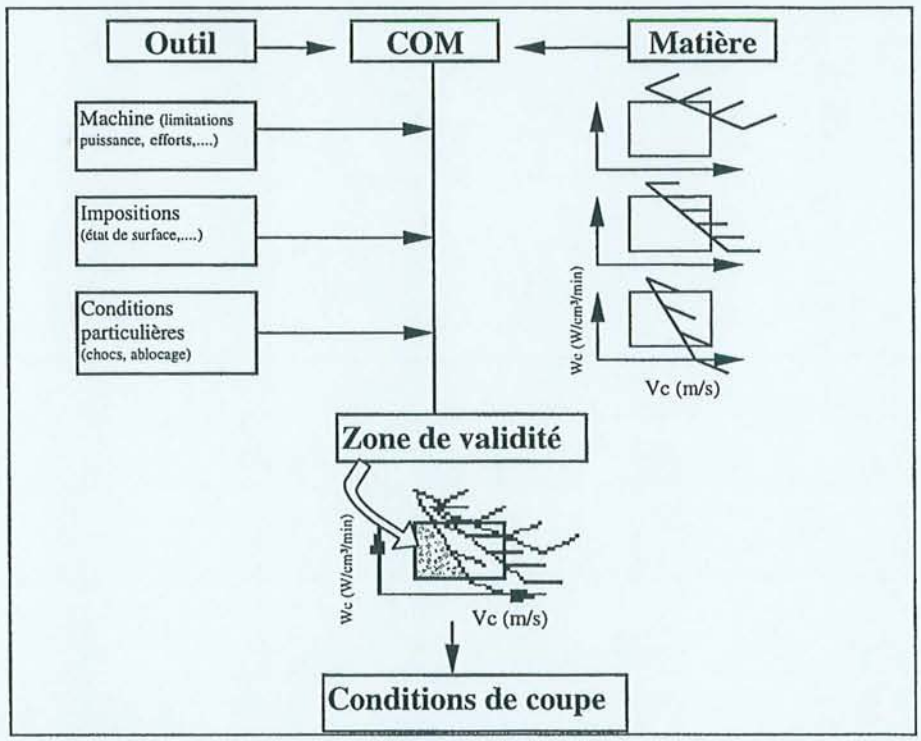


Figure 20 : Le choix d'un outil pour le COM.

3.4. Description

Le COM permet de fixer le domaine de fonctionnement d'un outil dans une matière. Il faut donc déterminer ensuite une zone qu'on appelle zone d'emploi sous contraintes, qui permettra d'assurer une faisabilité. Pour arriver à ce résultat, il faut structurer le COM en trois types de paramètres:

a) les paramètres limites de coupe
b) les paramètres de liaison
c) les paramètres auxiliaires

Le COM a donc pour but de définir le domaine d'emploi complet d'un outil dans une matière avec un nombre minimum d'essais. C'est en plus un moyen d'échange de données techniques entre les différents intervenants du processus d'usinage. Il permet de statuer immédiatement sur la faisabilité compte tenu des limitations induites par l'environnement (machine, état de surface,...).

En application de la norme XP E 66-520-2, le C.O.M. en fraisage comporte les caractéristiques suivantes :

a) Paramètres limites de coupe (PLC): représentent des maxima et des minima

- $ap_{,min}$, $ap_{,max}$: Profondeur de passe en millimètres (mm);
- $ae_{,min}$, $ae_{,max}$: Largeur de coupe en millimètres (mm);
- e_{min}, e_{max} : épaisseur de copeau mesurée à son maximum en millimètres (mm);
- $f_{z,min}$, $f_{z,max}$: Avance par dent, en millimètres par dent effective (mm/Z_u);
- $V_{c,min}$: Vitesse de coupe, en mètres par minute (m/min);
- T_{min}, T_{max} : durée de vie, en minutes (min) .

b) Paramètres de liaison (Pli): Permettent de relier les maxima entre eux et les minima entre eux. Par exemple, on ne peut pas prendre simultanément la hauteur max de coupe et la largeur max de coupe. Dans ce cas le paramètre de liaison est la section maximale de coupe :

- $A_{D,max}$: section de coupe, en millimètres carrés (mm²):

$$A_{D,max} = (ap * ae)_{max} \qquad (4)$$

On trouve aussi:

- Q_{max} : débit de copeaux vérifiant T_{min}, en centimètres cubes par minute (cm³/min);
- Les exposants E, F, G, D sont des constantes du modèle généralisé de Taylor exprimé selon la loi suivante:

$$ap^{F} * f_z^{E} * (ae / D)^{D} * T^{G} * V_c = C \qquad (5)$$

c) Paramètres auxiliaires (Pax): Qui permettent, à tout moment, de calculer les puissances, couples et efforts générés par l'usinage. Ces paramètres permettent de comparer l'énergie nécessaire à l'usinage et ce qui est réellement disponible dans l'environnement [BAG96].

On trouve en particulier les paramètres suivants :

- W_{sp} : énergie spécifique de coupe, en watts par centimètre cube par minute (W/cm³/min). Elle est exprimé à partir de la puissance de coupe Pc : W_{sp} = Pc/(ae*ap*Vf)
- m_c : coefficient correcteur de l'énergie spécifique de coupe, est fonction de l'épaisseur de copeau (sans dimension).

Le domaine de validité initialement déterminé sera restreint par la prise en compte de certaines contraintes comme:

- l'état de surface,
- les caractéristiques de la machine – outil.

Le point de fonctionnement réellement utilisé doit appartenir au domaine de validité résiduel (figure 21).

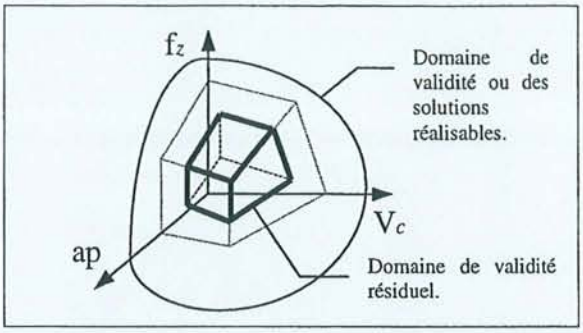


Figure 21 : Le domaine de validité résiduel.

L'obtention des paramètres du couple outil matière, passe par les trois étapes suivantes [LEV96]:

1. Modélisation de la coupe

2. Paramétrage expérimental

- couple outil matière de référence
- couple outil matière dérivée

donc:
- une méthodologie d'essai
- programmation des essais
- moyens de mesure et d'enregistrement des mesures
- analyse statistique, interprétation, stockage des essais.

3. Echange et achat de données certifiées avec:

- autres industriels
- laboratoires spécialisés
- fournisseurs d'outils et de matières.

Le problème du choix des paramètres de coupe consiste à déterminer les valeurs des variables de coupe (f_z, ap, V_c) pour chaque opération d'usinage, limitée par les performances dues à l'outil, à la machine et à la pièce. Ces limites engendrent des contraintes sur la détermination des variables de coupe. L'ensemble de ces contraintes borne le domaine des solutions. On trouve ainsi le niveau de faisabilité où des valeurs des variables de coupe qui appartiennent à l'espace des solutions réalisables défini par les contraintes et, le niveau d'optimisation qui permet d'obtenir les valeurs optimales des variables de coupe [LEF90].

La restriction du domaine de validité doit prendre en compte les contraintes suivantes:

- de géométrie de l'opération
- de qualité
- d'état de surface
- de caractéristiques de la machine – outil
- de conditions particulières

[LEV96] définisse l'opération d'usinage COM d'après le schéma suivant (figure 22):

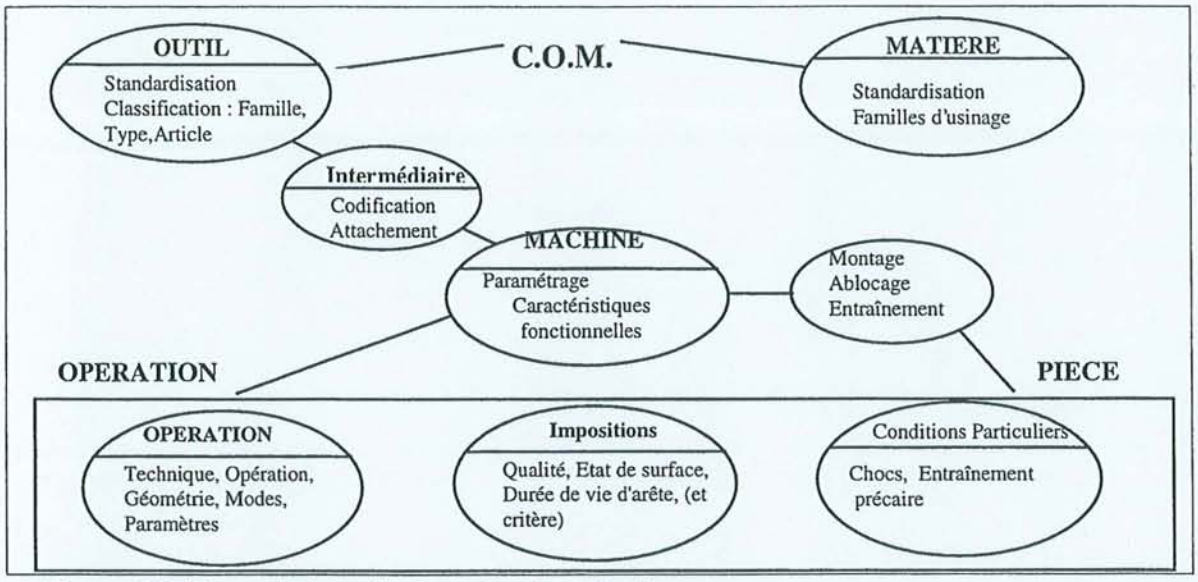


Figure 22: Description d'une opération d'usinage.

Ainsi, l'application général du COM doit considérer les aspects suivants :

A. Domaine d'application

Il est orienté vers l'usinage de type défonçage avec un outil de petit diamètre, avec pour objectif l'usinage des bois et dérivées dans l'industrie de seconde transformation du bois.

Il faut décrire les aspects suivants :

- Procédé,
- Classe de technique,
- Famille de technique,
- Genre de technique,
- Technique.

UNIVERSITÉ NANCY 1 BIBLIOTHÈQUE SCIENCES

B. Description de l'outil

La description générale indique :

- la définition de la famille de l'outil,
- la définition des types d'outil dans chaque famille,
- la définition des articles à l'intérieur de chaque type.

C. Description de la matière à usiner

La description de la matière à usiner comporte les informations suivantes :

C.1. Désignation
C.2. Caractéristiques de la matière

D. Description de l'opération

3.5. Les travaux sur le COM dans le domaine des métaux

[ARN96] a proposé la caractérisation du couple outil - matière sur des essais réalisés en chariotage, sur un tour parallèle à vitesse de broche variable, appliquée à des outils carbure usinant de l'acier. L'objectif était de valider une méthodologie expérimentale qui permette de modéliser le COM. Ainsi avec cette validation, il s'agissait de caractériser les COM dans des différents conditions d'usinage. La vitesse de coupe minimale utilisable sur la base des variations de l'effort spécifique de coupe a été recherchée. Sur les graphes de variation de l'effort spécifique tangentiel en fonction de la vitesse, une décroissance continue de ce paramètre a été observée. La détermination de la vitesse de coupe minimale est difficile, car la mesure précise de l'effort montre une variation continue de celui-ci.

La mesure des composantes de l'effort de coupe permet de montrer que l'évolution de la composante parallèle à l'avance, est bien corrélée avec l'usure frontale de l'outil, et que celle de la composante tangentielle n'est pas significative. La mesure de la puissance ne permet pas, à elle seule, de connaître le degré d'usure de l'outil.

Un modèle de la loi d'usure des plaquettes est également proposé. Il a procédé à une expérimentation établie sur la base des tables Taguchi. L'analyse de la variance a montré que les influences de la vitesse de coupe et de l'avance sont très significatives, tandis que celle de la profondeur de passe est négligeable. [BED97] ajoute qu'un plan d'expériences basé sur une table Taguchi permet, sans consommer trop de matière, d'apprécier les effets des 3 conditions de coupe (f_z, ap, V_c) sur la durée de vie de l'outil, et d'en déduire les coefficients du modèle de Taylor de la loi d'usure de l'outil.

Ainsi, cette étude permet de faire ressortir les aspects suivants : la mesure des efforts de coupe est un paramètre fondamental dans la recherche du point de fonctionnement pour un outil de coupe. Son comportement lors de l'usinage nous permet de fixer les limites dues à la vitesse de coupe. De plus ces efforts sont d'une grande utilité pour comprendre l'usure de l'arête de coupe. Pour des conditions d'usinage constantes, plus les efforts sont importants plus l'énergie de coupe l'est aussi. L'usure de l'arête de coupe est facteur expliquant ce phénomène. Elle détermine ainsi les limites d'usinage dans ces conditions. D'autre part, l'application des tables Taguchi permet de déterminer rapidement les effets des conditions de coupe sur la durée de vie de l'outil.

Un étude réalisé par [CAL96] dans l'usinage du titane montre l'application du COM à la coupe des métaux et permet d'affirmer que cette méthodologie est d'une grande utilité pour fixer les limites de travail d'un outil. Les conditions d'endommagement de l'outil de coupe ont été observées, pour ensuite les corréler avec les composantes des efforts de coupe, et finalement définir un critère qui permettra de faire la modélisation de la loi d'usure et le contrôle du processus.

Les auteurs ont trouvé qu'au-delà d'un certain temps d'usinage, lorsque l'usure de l'outil devient importante, l'évolution des efforts de coupe montre que la composante la plus sensible à la détérioration de l'arête est l'effort d'avance, tandis que l'effort de coupe reste sensiblement constant. Ils concluent que la disponibilité d'un critère indirect de suivi de l'usure à partir de la composante de l'effort d'avance permet de surveiller en temps réel le processus de coupe.

L'application du COM permet une fois que les conditions de coupe sont optimisées, de contrôler le processus d'usinage, en ayant comme critère le contrôle de la variation de l'effort de coupe pour estimer l'usure de l'arête de coupe.

L'importance de l'optimisation des conditions de coupe en utilisant la méthodologie Couple Outil – Matière permet d'autre part d'améliorer la qualité des produits, si nous faisons un contrôle sur des paramètres tels que l'état de surface, ainsi l'étude réalise par [RIG96] de modèles dynamiques du comportement des tubes minces en tournage, où il a travaillé dans l'usinage de tubes d'acier et aluminium de différents diamètres en utilisant le COM dans la vérification expérimentale. Il a cherché les conditions optimales de coupe pour que les vibrations du système soient les plus faible possible, donc, avec l'optimisation des conditions de coupe (e_m, ap, f_z, V_c, D) les auteurs ont trouvés des conditions de stabilité dans le tournage. Les moyens de contrôle de ces résultats ont été l'analyse de l'état de surface dans les pièces qui ont eu une vibration importante.

D'ailleurs [POU96] a recherché le domaine de validité dans la superfinition d'un acier inoxydable. Leur objectif a été de faire la modélisation de l'état de surface en tournage, afin d'optimiser les paramètres technologiques et rechercher le domaine de validité de la superfinition dans la coupe des métaux.

L'auteur indique que le problème de la technologie pour réaliser des surfaces « super finies » par outil coupant est que les points de fonctionnement sont très instables parce qu'ils sont déterminés par l'expérience ou par le hasard. Il ajoute que pour la détermination de ces points de fonctionnement on ne trouve aucune logique ni base scientifique, et dans l'état actuel des connaissances, pour un même couple outil - matière, on trouve des points de fonctionnement très différents.

Il conclut que les résultats lui ont permis de préciser les limites des paramètres de coupe et de trouver le domaine de validité (V_c, ap, f_z) pour obtenir les meilleurs résultats en termes d'état de surface dans le domaine de la superfinition. Il indique qu'après avoir trouvé le domaine de validité optimal, les paramètres importants pour la qualité de la surface sont : la machine, l'usure de l'arête, la nuance du matériau de coupe, les paramètres de coupe et la géométrie de l'outil.

[VIL96] a fait l'étude du choix optimisé de fraises associées à une entité d'usinage de type alésage. Son travail été centré sur la modélisation des conditions de coupe et sur le choix de l'outil de coupe pour un matériau métallique. Il s'agissant également d'identifier les limites d'utilisation de l'outil.

A partir des données connues de vitesse d'avance et de rotation en fonction du matériau à usiner, du diamètre de l'outil, de la hauteur d'usinage et de la passe radiale, il a réalisé un modèle. Pour la recherche des données limites, une fois déterminés les paramètres v_f et V_c, le problème était de trouver une plage admissible d'épaisseur du copeau, en correspondance avec une vitesse d'avance, pour un matériau et un diamètre d'outil donné. Il a aussi recherché le débit maximum de copeau pour déterminer le diamètre optimum de l'outil et fixer v_f, V_c, ap et f_z. Il constate que pour une hauteur et une longueur à usiner données, il est plus intéressant de prendre une hauteur maximale et plusieurs passes radiales que le contraire. Il ajoute que si on fait l'étude du débit en fonction de la profondeur de passe, tout autre paramètre fixé, on constate qu'il est toujours plus rentable de prendre la profondeur le plus grand possible.

Les points les plus importants à considérer sont :

- La détermination des coefficients de la loi de Taylor de l'usure de l'outil (l'application des plans d'expériences Taguchi),
- La mesure des efforts de coupe, qui ont un rapport significatif avec l'usure de l'arête de coupe,
- La mesure de la puissance consommée par le moteur de la machine n'est pas suffisamment sensible pour une corrélation avec l'usure de l'arête,
- Les vitesses de coupe et d'avance sont les paramètres les plus influants dans la loi d'usure.

Ainsi, nous pouvons préciser que d'après la bibliographie, les objectifs du COM sont de maîtriser :

- l'usure de l'arête de coupe,
- la qualité de surface usinée,
- de limiter la puissance et les efforts de coupe, limiter les déformations des pièces et des outils,
- le choix de paramètres optimum et séparés pour l'ébauche et pour la finition.

Pour les autres études qui ne sont pas directement liées au COM, mais à la recherche des conditions de coupe et des conditions limites de coupe dans des situations particulières, les points suivants ressortent :

- Etant donné une vitesse de rotation et une profondeur de passe, il est important de déterminer la plage d'épaisseurs de copeaux (une vitesse d'avance donnée) pour travailler entre e_{min} et e_{max}.
- Pour la détermination maximale du débit, il est intéressant de prendre une profondeur de passe maximale et plusieurs largeurs de coupe.
- En optimisant les conditions de coupe, les vibrations de l'outil sont minimisées et l'état de surface est amélioré.
- La détermination d'un point de fonctionnement (V_c, ap et f_z) se fait sur la base d'évaluation de l'état de surface.
- on peut trouver des points de fonctionnement différents pour un même COM.

3.6. L'usinage du bois et COM

3.6.1. Notre démarche

L'orientation de notre recherche porte sur les usinages du type défonçage avec un outil de petit diamètre. Ce type d'usinage prend beaucoup d'importance lorsqu'il s'agit de l'industrie de seconde transformation du bois et plus précisément dans l'usinage de chants de panneaux (en particulier en MDF), en réalisant les fonctions d'assemblage rainure – languette, esthétique. Il s'agit également du défonçage de moulures extérieures ou intérieures. Il est important de considérer aussi l'état de surface résultant de l'opération (pour l'application de peinture ou de vernis sur le chant).

Il s'agit de produits d'une grande valeur relative, puisqu'ils ont déjà subi un processus de transformation. L'importance de proposer une application du Couple Outil Matière réside dans le fait que cette méthodologie permet de trouver les conditions optimales d'usinage dès la mise en route de la production. Ces conditions optimales nécessitent une connaissance précise des caractéristiques de l'outil et de la matière à usiner. Ainsi, il est possible d'étudier l'optimisation de l'usinage dans le cas de l'application de nouveaux matériaux d'outils, de nouvelles essences. Actuellement, de nombreuses essences restent dans un état « stationnaire » en ce qui concerne la recherche en usinage. Il s'agit aussi de considérer de nouvelles machines travaillant avec de plus grandes vitesses de coupe et d'avance.

L'usinage du bois utilise de nombreux termes de métier et nous essayons ici d'apporter une vue structurée à travers des définitions :

Le Procédé de défonçage

Le but du défonçage est d'usiner une surface déjà coupée en fournissant une surface de qualité moyenne à bonne, afin de donner la forme définitive. Elle peut être gardée tel quel ou être reprise par ponçage, ou encore subir un traitement de finition. Ce procédé comprend l'opération de profilage, qui a pour objectif de rendre à la pièce un caractère esthétique (une moulure), ou un caractère technique (condition d'assemblage entre deux pièces).

Classe de technique

Le phénomène physique de l'usinage se limite essentiellement à l'enlèvement de matière sous la forme de copeaux discontinus.

Famille de technique

Le défonçage se fait par l'intermédiaire d'arêtes de coupe à géométrie définie. Ces arêtes peuvent former partie intégrale de l'outil ou bien être amovibles sous la forme de plaquettes rapportées sur un support.

Genre de technique

Le genre de technique correspond au fraisage.

Technique

Le type de technique susceptible d'être appliquée correspond au fraisage en bout, de chant, en pleine matière (rainurage) ou sur la face principale du panneau en roulant (figure 23).

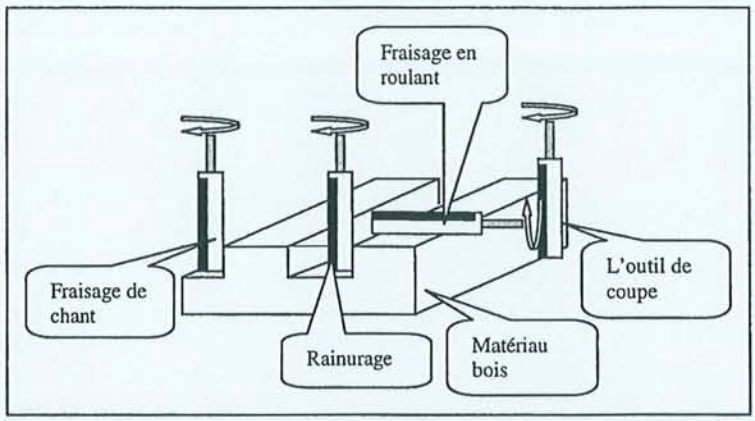


Figure 23 : Techniques susceptibles d'être appliquées.

3.6.1.1. Description de l'outil

L'outil de coupe est soit composé d'un corps monobloc dans lequel les arêtes de coupe sont intégrées ou soit d'un porte plaquettes amovibles. Le corps de l'outil possède alors les dispositifs nécessaires à leur positionnement dans l'espace.

Pour faire la description de l'outil il faut distinguer trois étapes :

- la définition de la famille de l'outil
- la définition des types d'outil dans chaque famille
- la définition des articles à l'intérieur de chaque type.

Définition de la famille

L'outil de défonçage est constitué d'un corps sur lequel sont présentes une ou plusieurs arêtes de coupe. On trouve de plus en plus généralement des outils à plaquettes amovibles.

Le mouvement de coupe circulaire est fourni par le moteur qui actionne la broche dans laquelle l'outil est monté.

La section de coupe est variable au cours de la coupe. Elle est constante tout suivant la longueur de l'arête de coupe.

Il existe une ou plusieurs parties actives. Le nombre est limité par le diamètre de l'outil.

La coupe est réalisée par une fraise deux tailles travaillant sur différentes surfaces, fraisage de surface, du chant, de bout, etc.

Le mouvement d'avance est soit perpendiculaire à l'axe de l'outil ; soit parallèle à son axe ; soit encore variable au cours de l'usinage. Le mouvement peut être unidirectionnel, plan 2D ou spatial 3D.

Définition du type d'outil

La première caractéristique précise la forme. Par exemple :

- mèches à défoncer pour mandrin excentrique (rainurage)
- mèches à défoncer hélicoïdale d'ébauche (mise au format)
- mèches à défoncer d'ébauche plaquette réversible (mise au format)
- mèches à défoncer hélicoïdale de finition (mise au format)
- mèches à défoncer hélicoïdale, angle d'hélice alterné (mise au format)
- mèches à défoncer plaquettes réversibles (mise au format)
- porte outils à dresser/feuillurer plaquettes réversibles (dressage -feuillurage)
- porte outils à chainfreiner (chainfreinage)
- porte outils profil – quart de rond (profilage)
- porte outil profil (profilage universel)
- porte outils contre-profil (profilage – assemblage profil contre profil)
- mèches à sculpter (sculptage)
- mèches oscillantes (mortaisage)

On trouve ensuite les constituants selon la norme ISO :

- HS acier rapide
- HW carbure de tungstène
- HL acier fortement allié
- DP diamant polycristallin (PKD)
- SP acier spécial
- ST stellite

La définition des outils est effectuée suivant une forme précise

- désignation normalisée
- référence fournisseur
- diamètre nominal
- nombre des dents
- longueur utile
- longueur totale
- pas de la denture
- dimension de queue
- géométrie de l'arête : angles de taillant et de coupe.

La définition des plaquettes est effectuée à partir des critères suivants :

- désignation normalisée ou forme et taille
- référence fournisseur
- mode de fixation
- position (extérieure, centrale, en bout, sur hélice)

3.6.1.2. Description de la matière à usiner

La description de la matière à usiner comporte les informations suivantes :

Désignation

- désignation générale, nom commun, nom latin
- désignation normalisée (s'il existe)

Caractéristiques de la matière

- caractéristiques mécaniques(module d'élasticité MOE, module de rupture MOR, résistance flexion – compression)
- densité
- taux d'humidité
- provenance
- composition des essences constituantes

3.6.1.3. Description de l'opération

Nous considérons le défonçage dans le plan tangentiel, en opposition, sur le chant, avec coupe ouverte sur une face de l'éprouvette.

Les paramètres propres à l'expérimentation sont les suivants (figure 24):

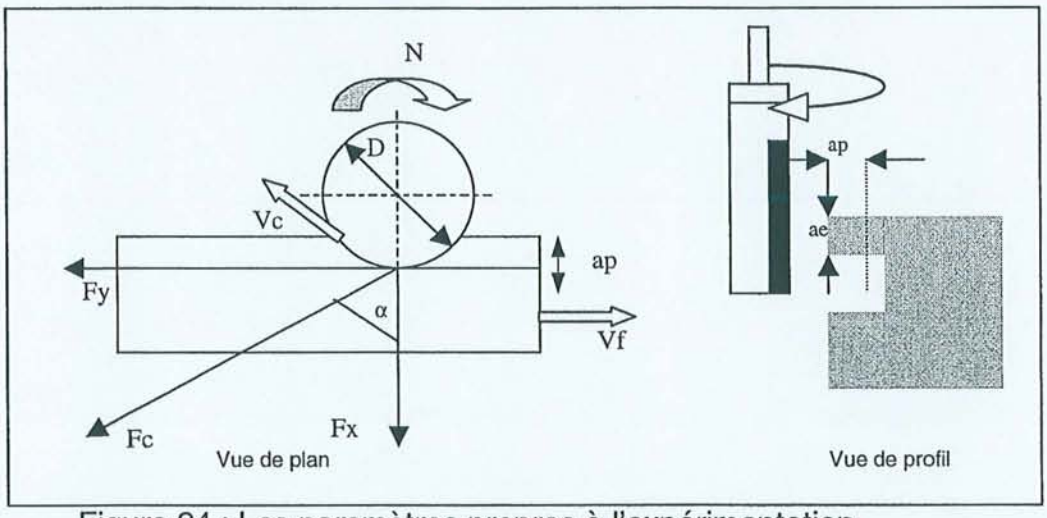


Figure 24 : Les paramètres propres à l'expérimentation.

Sur cette opération, nous faisons les observations suivantes :

- En travaillant en opposition, la vitesse de coupe est égale à la vitesse de coupe (Vc) de l'outil plus la vitesse d'avance de la pièce (Vf). Dans le cas du travail en avalant, la vitesse de coupe est égale à la vitesse de coupe de l'outil moins la vitesse d'avance de la pièce.

- L'épaisseur de copeau augmente en opposition et diminue en avalant. L'influence est très importante sur les efforts de coupe et sur les chocs. Ces derniers se produisent d'une façon plus ou moins importante en fonction du type de travail. Finalement ceci a des conséquences sur l'usure de l'arête de coupe.

- La longueur de contact entre l'outil et la pièce change en fonction du type de travail. Ainsi pour le travail en opposition, la longueur de contact est plus grande qu'en avalant (figure 25).

$$L = R[(\text{Arccos}\,(1-ap/R) \pm (fz\,Z\sqrt{D\,ap - ap^2})/\pi D)]$$

+ opposition
- avalant

L = longueur de coupe	vf = vitesse d'avance
ap = profondeur de passe	fz = avance par dent
R = D/2	Z = nombre de dents
D = diamètre de coupe	N = vitesse rotation
em = épaisseur moyenne de copeau	

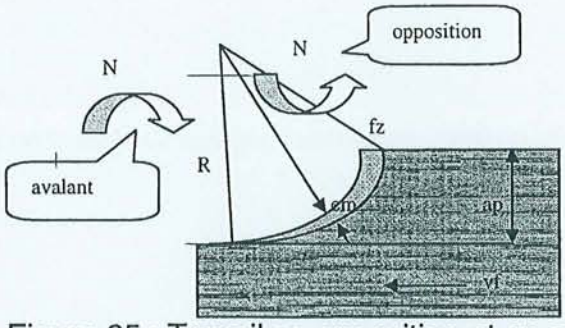


Figure 25 : Travail en opposition et en avalant.

- Les efforts de coupe présentent un changement de sens et d'intensité suivant le type de travail et sous l'effet de chocs. Ceux-ci produisent des puissances de coupe différentes.

3.6.2. Travaux antérieurs

En ce qui concerne directement l'application du COM au matériau bois, nous citons à [LER96] qui ont fait une pré - étude de détermination d'un couple outil - matière dans le MDF. L'objectif a été d'appliquer la méthodologie COM développée par la société TOOL dans l'usinage du bois avec outils de type toupie à 2 et 20 dents. Il a travaillé en mesurant les efforts de coupe et la puissance pour ainsi trouver les vitesses de coupe et les épaisseurs du copeau minimal. De plus, la caractérisation des surfaces et l'analyse de la mouillabilité et du collage ont été réalisées.

Les résultats précisent qu'il est difficile de déterminer une vitesse de coupe minimale avec un outil 2 dents, avec les résultats issus de la mesure de puissance ou des efforts de coupe. Dans les deux cas les courbes trouvées sont assez plates, il est difficile de trouver le point où se trouve la vitesse de coupe minimale, par contre avec un outil 20 dents les résultats sont de meilleure qualité.

D'après les auteurs les problèmes sont dûs au fait que l'outil ne possède pas assez de dents et durant l'usinage celles-ci passent trop de temps hors de la matière, les efforts de coupe ne durent qu'entre 10 et 20 % sur un tour. La pièce et l'outil sont soumis à des chocs intensifs. Dans le cas de l'outil 20 dents, il y a toujours au moins une dent qui travaille pendant l'usinage, et les signaux reçus tant des efforts de coupe comme de puissance sont plus clairs.

Pour les essais d'épaisseur de copeau minimum, ils trouvent de bons résultats. Ce paramètre déterminé avec la mesure de puissance a des tendances très homogènes par rapport à celui mesuré avec les efforts de coupe.

Il conclut que les courbes ont sensiblement la même forme mais avec des valeurs d'effort inférieures par rapport au travail du métal. Ainsi le COM est valide pour être appliqué à l'usinage du bois. Un problème très important a été la limite des vitesses de coupe, laquelle est imposée par la machine, qui ne permet de travailler qu'avec les limites inférieures du domaine d'utilisation.

3.7. Conclusions

Le Couple Outil Matière est une méthodologie utilisée principalement dans l'usinage en tournage, fraisage et perçage des métaux. Elle a pour objectif de caractériser une zone de bon fonctionnement de différents matériaux face à des conditions opératoires diverses. Cette méthodologie permet d'expliquer l'évolution de l'usure de l'arête de coupe en correspondance avec l'évolution des efforts de coupe. D'autre part, l'optimisation des conditions d'usinage des métaux avec l'aide du COM, permet le contrôle du processus pour obtenir un état de surface souhaité.

Au niveau bois et de ses dérivés, le problème qui reste à résoudre dans toute étude est de chercher à prédéterminer les conditions de coupe et les paramètres influents. Le matériau, les contraintes extérieures comme la densité et l'humidité sont très variables, influencent directement les paramètres mesurés, ce sera donc le matériau qui posera les contraintes maximales, malgré la connaissance de l'outil et de modèles de coupe.

C'est la raison pour laquelle dans un premier temps nous travaillons sur un matériau plus homogène que le bois massif : le MDF.

Pour [LER96], précisons que les conditions de choix du point de fonctionnement méritent d'être améliorées. Ce point est déterminant sur tout le développement des essais a posteriori. Si les conditions de coupe pour une situation en particulier ne sont pas connues, il faudra développer des essais pour ainsi trouver avec plus de certitude la plage où nous devons nous placer.

IV. L'EXPERIMENTATION

4.1. Le Matériel Expérimental.

4.2. Méthodes.

- 4.2.1. Définition des essais.
- 4.2.2. Traitement des signaux.
- 4.2.3. La mesure de puissance.
- 4.2.4. La mesure de l'état de surface.

4.3. Le matériau étudié : le MDF.

- 4.3.1. Généralités.
- 4.3.2. Caractérisation du matériau.
- 4.3.3. L'humidité et la densité caractérisation lors des essais.
- 4.3.4. Essais préliminaires de caractérisation de Ke.

4.4. Démarche expérimentale.

- 4.4.1. Conditions générales.
- 4.4.2. Essai de qualification.
- 4.4.3. Détermination de la vitesse de coupe minimale.
- 4.4.4. Détermination de l'épaisseur de copeau minimum et maximum.
- 4.4.5. Détermination des données limites.
- 4.4.6. Essai d'usure.

IV. L'EXPERIMENTATION

L'étude bibliographique nous permet de cerner les points concernant le matériau, les conditions de coupe et les pré-requis d'utilisation du C.O.M. Ainsi, les réglages des paramètres d'usinage sont fonctions du matériau. Les conditions de coupe doivent être réglées en fonction des limites de la machine et de l'outil, avec pour but un état de surface convenable de la pièce, une maximisation de la durée de vie de l'outil et un travail en sécurité. De ce fait, les paramètres de coupe influents sont l'avance par dent, la vitesse de coupe et la profondeur de passe.

4.1. Le matériel expérimental

Pour réaliser cette recherche nous avons travaillé avec des panneaux MDF de même densité. Nous avons réalisé la mesure du taux d'humidité et de la densité sur un échantillon de chaque éprouvette, pour contrôler ces deux variables et connaître les conditions initiales (voir point 4.3., pagine 60).

Les éprouvettes : Pour la mesure des efforts de coupe, il est nécessaire de travailler avec des éprouvettes de dimensions très particulières (figure 26). Elles doivent s'ajuster sur la platine de mesures afin d'être très stable. Les dimensions des éprouvettes sont les suivantes:

- base de 135 mm de long
- côtés biseautés à 10°
- largeur de 50 mm

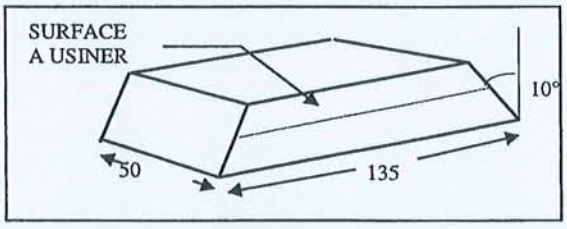


Figure 26 : Les éprouvettes retenues pour l'usinage.

Pour la réalisation des essais de puissance on reprendra la forme précédente avec une longueur d'un mètre, afin de réaliser des mesures convenables.

La machine Dubus : La machine est une perceuse instrumentée de type "DUBUS CNC - NUM 570" (figure 27). Un variateur de fréquence de rotation de l'outil permet d'avoir une stabilité de la vitesse de rotation entre 1800 et 12000 tr/mn. Elle est dotée d'un moteur de 1,5 kW. L'opération d'usinage réalisée est du type fraisage. Le type d'outil utilisé est à denture droite à plaquettes en carbure, avec 1 dent, un angle de coupe de 18° et un angle de taillant de 57°.

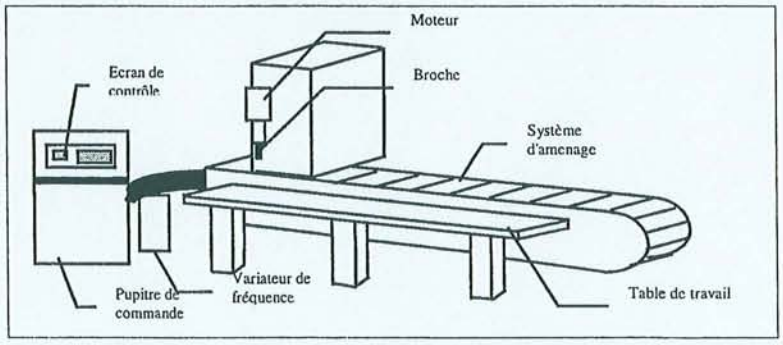


Figure 27 : La machine Dubus.

Cette machine a une grande flexibilité. Elle permet de travailler avec des vitesses de coupe différentes et des vitesses d'avance de 0 à 12 m/min. Par ailleurs, il est possible de régler le type d'outil le mode de travail, et, avec une grande précision, la profondeur de passe et la largeur de coupe.

Le Topovise@ pour la mesure des états de surface: La méthode a été validée par de nombreuses expériences de laboratoire et industrielle [MAR94b]. La méthode de mesure est associée à un matériel composé de (figure 28) :

- d'une caméra matricielle avec son émulateur. La matrice est de dimension 512 x 512 et l'information est codée sur 8 bits (255 niveaux de gris),
- d'une carte de vision et sa bibliothèque procédures,
- d'un laser d'une puissance de 5 mW,
- d'une enceinte d'essai.

Chaque série des essais est soumise à l'analyse de surface par la méthode vision laser « TOPOVISE » [TRI95] dont les résultats sont exprimés en termes d'écart type, donc nous considérons pour nos analyses les écarts de rugosité et d'ondulation, et en plus les YY et XX qui correspondent aux hauteurs des pics et aux distances entre pics respectivement (figure 29).

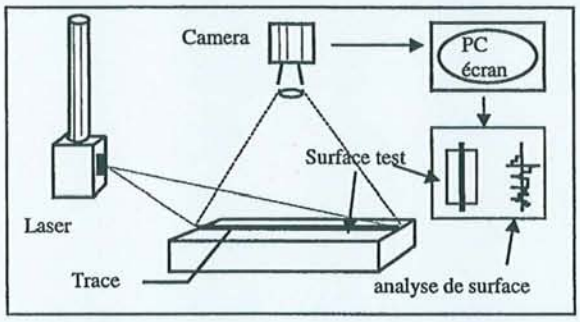


Figure 28 : Schéma d'analyse de surfaces.

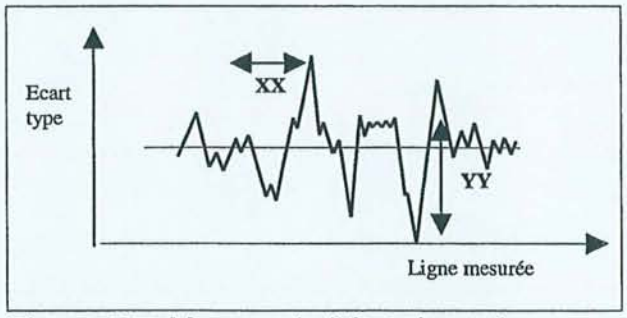


Figure 29 : Mesure de l'état de surface.

Le wattmètre : Il s'agit d'un wattmètre numérique. Cet équipement permet de mesurer la puissance d'une façon très simple. Il est branché entre le variateur et la broche, et la prise de mesure se fait par lecture directe. Le niveau maximal de lecture est de 4 kW.

L'axe à grand vitesse : cet axe permet de provoquer les déplacements de la pièce à usiner montée sur le dynamomètre Kistler. La machine Dubus reste fixé sur un point. De cette façon la précision de la vitesse d'avance est maximale, et non sujet aux variations naturelles, parfois importantes. Ceci est due à la grande masse à déplacer que représente l'ensemble moteur – système d'amenage Dubus. Cet axe (figure 30), présente les caractéristiques suivantes :

Le principe de fonctionnement est basé sur deux composantes que produisent la force de poussée : un barreau magnétique fixe et un bloc mobile qui assure le déplacement et le positionnement de la charge.

Les caractéristiques techniques sont :

- vitesse de quelques millimètres par seconde à environ 3 m/s (vitesse d'avance de 180 m/min). La vitesse limite des essais a été de 2.9 m/s,
- accélération maximale de 20 m/s².

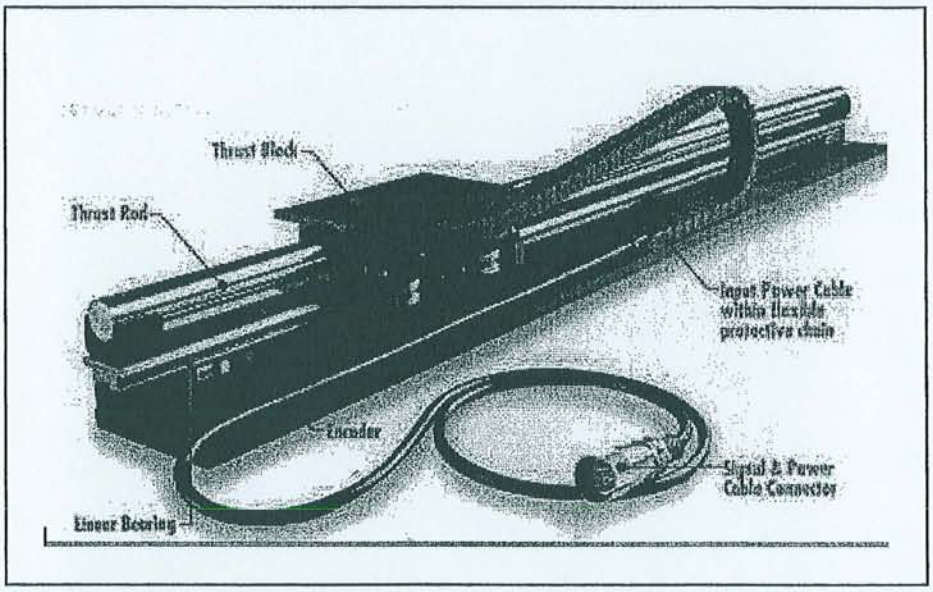


Figure 30 : L'axe grande vitesse.

Ce moteur présente une grande souplesse lorsque on veut travailler sur une grande amplitude de vitesses. L'accélération est instantanée et la vitesse ne varie pas d'une façon significative lors de l'usinage. Cet axe permet de travailler dans des conditions d'usinage extrêmes, c'est à dire, avec des épaisseurs de copeau très importantes. Seule la contrainte associée à la vitesse de rotation limitée donnée par la machine Dubus (12500 tr/min), limite l'utilisation de l'axe à des faibles vitesses de l'ordre de 20 m/min.

<u>L'outil de coupe</u> : Pour les essais d'usinage des outils de type dits normaux, qui sont couramment employés dans le travail de défonçage ont été utilisés.

Les caractéristiques de l'outil utilisé sont (figure 31):

- alésage 10 mm (d)
- diamètre de coupe 14 mm (D)
- largeur maximale de coupe 30 mm (NL)
- angle de coupe 18°
- angle de taillant 57°
- dénomination outil : Leuco - 7 C6
- nombre de dents 1
- matériau de coupe : carbure de tungstène désignation Leucodur HL 05 (ISO K 05) (voir tableau 2 en chapitre II, pagine 35)

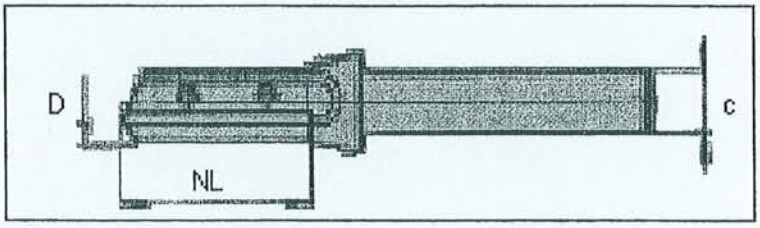


Figure 31 : l'outil retenu par l'usinage.

La mesure des efforts de coupe : L'élément basique pour effectuer la mesure des efforts de coupe est la platine dynamométrique Kistler type 9257A. Celle-ci comprend un corps d'acier où sont insérés 4 capteurs piézo-électriques de quartz (Figure 32). Ces capteurs permettent de mesurer les efforts de coupe suivant trois axes principaux, l'axe z parallèle à celui de la broche, l'axe y parallèle à la direction de l'avance de la pièce et l'axe x qui est perpendiculaire aux deux autres, c'est-à-dire, l'axe y correspond à la mesure de l'effort axial et l'axe x à l'effort normal.

Le principe de fonctionnement du capteur piézo-électrique est le chargement et le déchargement des cristaux sous contrainte. Il se crée ainsi une charge électrique proportionnelle à la grandeur de la composante mécanique pour chacune des trois composantes x, y et z, ensuite la charge électrique produite par les capteurs est conduite par des câbles blindés vers les amplificateurs de charges. Les amplificateurs de charges utilisés sont du type KISTLER 5001. Leur fonction consiste à transformer la charge électrique produite par les capteurs de mesure (entrée) en une tension proportionnelle (sortie).

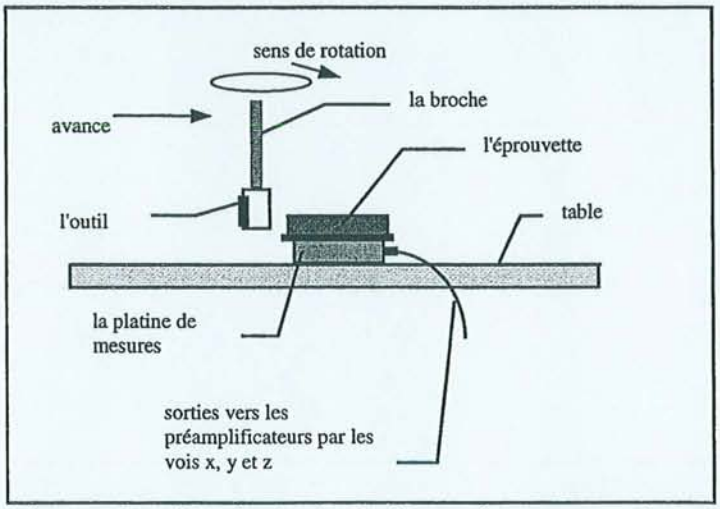


Figure 32 : Vue latérale du banc de mesure des efforts de coupe.

4.2. Méthodes

4.2.1. Définition des essais : A partir des caractéristiques opérationnelles de la machine Dubus, il est possible de définir clairement les différents essais à réaliser. Pour une partie, nous avons en effet les paramètres d'action. Ils définissent les essais. Pour une autre nous avons les paramètres de mesure. Ils déterminent les données de sortie.

Les paramètres d'action sont les suivants:

- la vitesse de coupe, V_c (m/s),
- la vitesse d'avance, V_f (m/min),
- la profondeur de passe, ap (mm),
- la largeur de coupe, ae (mm),
- le type du MDF (densité),
- les caractéristiques de l'outil (D, Z, γ),
- le mode de travail (avalant, opposition).

Les paramètres de mesure sont:

- les efforts de coupe,
- la puissance,
- l'état de surface,
- l'usure de l'outil (cf. page 74).

Les conditions d'expérience auront pour base:

- l'utilisation d'un type d'outil (carbure) d'une géométrie constante,
- l'usinage suivant un mode de coupe,
- la mesure des deux composantes principales de l'effort de coupe; l'effort axial ou selon l'avance de l'éprouvette (F_y) et l'effort normal ou perpendiculaire au déplacement de l'éprouvette (F_x),
- la mesure de la puissance électrique moyenne de la broche,
- la mesure de l'état de surface.

4.2.2. Le traitement des signaux a été effectué à l'aide du logiciel DADISP qui dispose d'un grand éventail de fonctions mathématiques. Ce logiciel est bien adapté à la mesure des fréquences de résonance.

Les signaux transmis par les amplificateurs (figure 33) sont traités pour être enregistrés par la carte d'acquisition. Les données acquises sont ensuite affichés sur l'écran dont est possible des connaître sous la forme de graphique de signal brut par chaque voie de mesure (x, y et z) ou après filtrage sous la forme de signal brut traité (filtrage passe-bas, moyenne mobile).

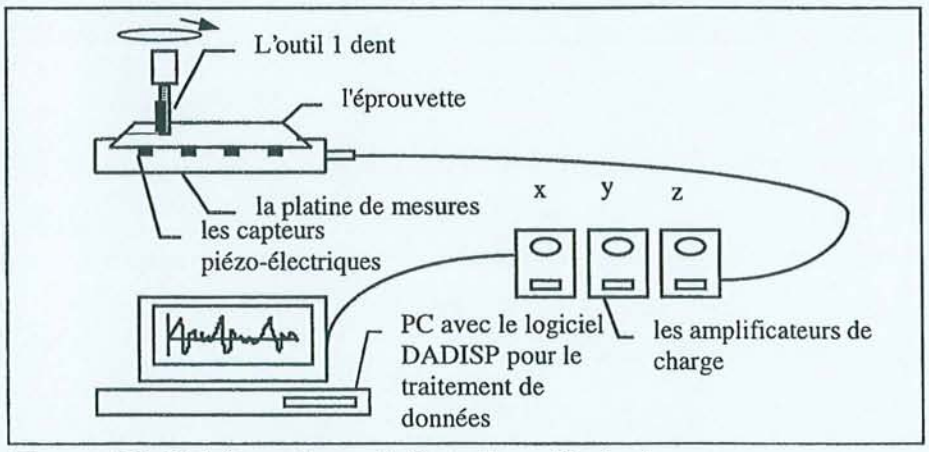


Figure 33: Schéma d'acquisition des efforts de coupe.

Le calcul des efforts de coupe se fait sur les pics mesurés lors de l'acquisition des données. Ensuite un calcul de la moyenne des pics est conduit. Chaque pic correspond à l'effort maximal d'arrachement du copeau. Le graphique indique l'effort (N) (sur l'axe des ordonnées) en fonction du temps (sec) (sur l'axe des abscisses) (figure 34).

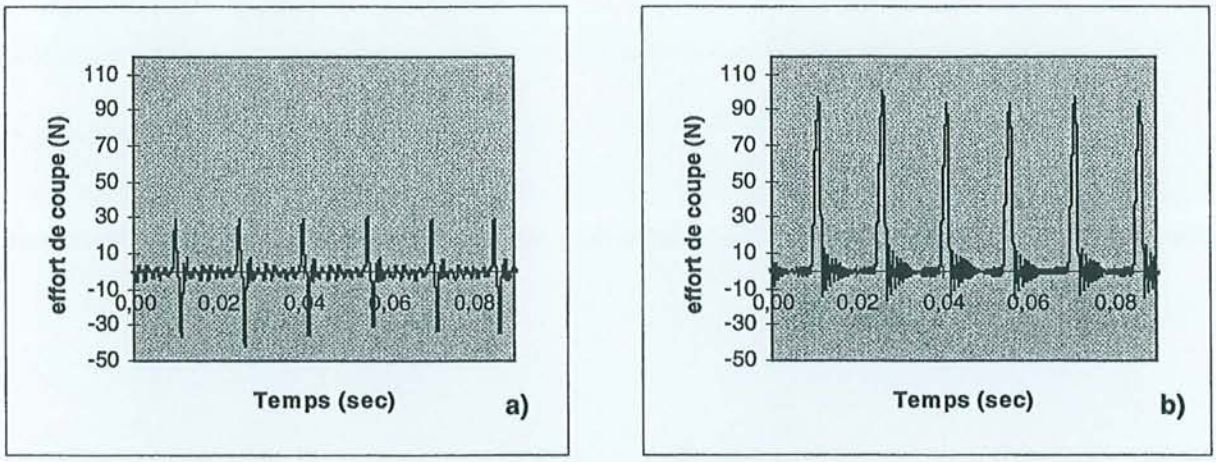


Figure 34 : a) Efforts de coupe dans la direction de la profondeur de passe **x**;
b) efforts de coupe dans la direction de l'avance **y**.

4.2.3. La mesure de puissance

Pour les essais de mesure de puissance, des planches d'environ 1 mètre de long seront usinées. Elles ont une largeur qui permettra une quantité appropriée de passes d'épaisseurs égales à celle des petites éprouvettes utilisées pour les mesures d'effort. Alors pour chaque éprouvette, chaque mode de travail et chaque profondeur de passe on fera quatre mesures de puissance.

Le wattmètre donne une valeur de la puissance à vide quand l'outil ne fait pas d'usinage, et une valeur de la puissance totale en phase d'usinage. La puissance de coupe est obtenue par soustraction de la valeur de la puissance totale à la puissance à vide.

4.2.4. La mesure de l'état de surface

Le principe pour qualifier un état de surface par vision est d'éclairer la surface usinée de l'éprouvette à l'aide d'une lumière rasante pour augmenter le contraste entre les creux, dans une zone d'ombre, et les pics éclairés.

Une ligne est éclairée à l'aide du laser et l'éprouvette est déplacée pour balayer toute la surface. L'image de la surface est ensuite captée par la caméra matricielle, l'analyse de l'image de la surface est conduite avec un logiciel pour estimer la rugosité superficielle.

Le critère principal choisi est l'écart type du profil de rugosité mesuré.

L'analyse des surfaces obtenues après usinage s'effectue principalement selon la méthode de vision artificielle, cependant on n'écarte pas deux autres méthodes comme :

- l'appréciation viso - tactile
- la mesure par palpage mécanique (dont les principaux critères sont R_a, R_z, R_{max}, R_t et R_p).

4.3. Le matériau étudié : le MDF(1)

4.3.1. Généralités

L'objectif de ce sous-chapitre est de mieux connaître le matériau MDF pour les types d'usinages courants au niveau industriel : de connaître les niveaux des efforts de coupe et l'orientation de ses composantes, ses effets sur le matériau en terme d'état de surface et l'effet des différentes couches de densité. Notre problème fondamental reste à déterminer les conditions acceptables de coupe, pour une durée de vie de l'outil donné et un état de surface de la pièce qui respecte un usage déterminé.

4.3.2. Caractérisation du matériau

4.3.2.1. Détermination de la masse volumique

La masse volumique des produits dérivés du bois est exprimée en donnant la masse (kg) d'un mètre cube de panneau (kg/m³). La masse volumique des panneaux multicouches, comme celle des panneaux de particules de qualité ameublement, varie fortement sur la section du panneau. Grâce au mélange homogène de ses fibres, le profil de masse volumique est moins accentué sur la section du MDF.

La masse volumique n'est pas nécessairement un critère de performance fiable. Pour un même type de panneau, les panneaux de masse volumique nettement plus élevée peuvent normalement être considérés comme plus résistants. Pour cette caractéristique, il faut contrôler la variabilité. La norme industrielle EMB donne une limite de ± 7 % de variation de la masse volumique dans un même panneau.

Nous avons prise une échantillon de nos éprouvettes pour faire la détermination de la masse volumique. Le calcul se fait d'après la formule:

$$D = \frac{m}{v} \quad (gr/cm^3)$$

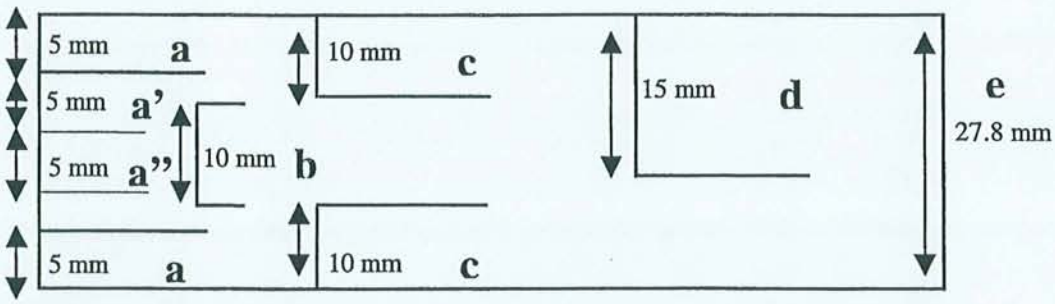
UNIVERSITÉ NANCY 1 BIBLIOTHÈQUE SCIENCES

où D : masse volumique en gr/cm³
m : la masse de l'éprouvette en gr
v : le volume de l'éprouvette en cm³

On sait que la densité de cet matériau varie d'une valeur maximale dans la face extérieure jusqu'à une valeur minimale dans la partie moyenne du panneau. Pour connaître avec précision cette variation, nous avons procédé de la façon suivante:

De l'épaisseur total (28 mm) nous avons enlevé les deux couches extérieures de 5 mm d'épaisseur, une couche moyenne de 10 mm, deux couches extérieures de 10 mm et une couche de 15 mm, ainsi nous arrivons au schéma suivant où sont indiqués les résultats :

(1) [AGU99a]



- **a** : 0.89 gr/cm³ - **b** : 0.66 - **c** : 0.82 - **d** : 0.76 - **e** : 0.77
- **a'** : 0.77
- **a''**: 0.67

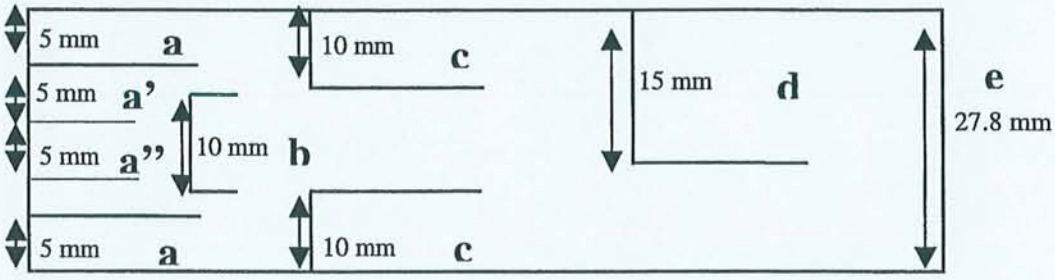
4.3.2.2. Détermination de l'humidité

Les mêmes échantillons utilisés pour la détermination de la masse volumique, nous ont permis de faire la détermination de l'humidité. La formule que nous permet de trouver cette propriété est:

$$CH = \frac{mh - mo}{mo} * 100 \quad (\%)$$

où : CH = la teneur d'humidité en %
mh = la masse de l'éprouvette humide en grammes
mo = la masse de l'éprouvette sèche en grammes

Chaque échantillon a été séché pendant 72 heures à 105°C, les résultats sont:



- **a** : 7.2 % - **b** : 7.8 - **c** : 7.0 - **d** : 7.3 - **e** : 7.2
- **a'** : 7.2
- **a''**: 7.2

En règle générale, l'humidité d'un panneau MDF est de 5 à 8 % en sortie presse. Cette valeur évolue après stabilisation pour se situer aux alentours de 7 % sous nos climats.

Nous avons fait une caractérisation du matériau en termes de son humidité et densité, et ensuite nous avons réalisé une série d'essais tendant à corréler ces données avec les mesures des efforts de coupe, puissance et états de surface pour ainsi essayer de mieux comprendre l'effet de la densité et du type de coupe sur les résultats des paramètres cités ci-dessus.

4.3.3. L'humidité et la densité caractérisation lors des essais

Nous avons procédé à la détermination du taux d'humidité et de densité sur des échantillons de la façon suivante (figure 35):

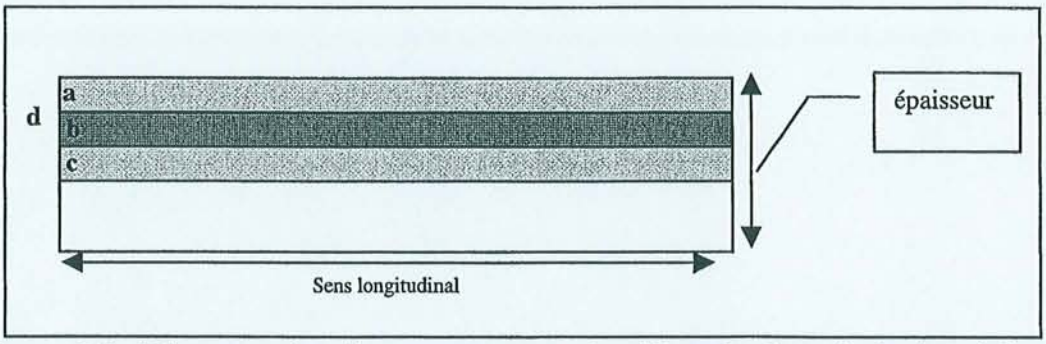


Figure 35 : Découpe des éprouvettes pour la détermination de la densité et l'humidité.

Ainsi, les résultats sont :

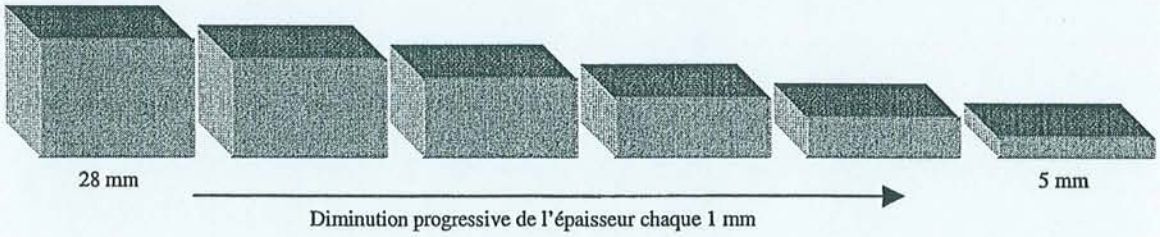
- une première couche de 5 mm d'épaisseur (a) : densité = 0.89 (d1)
- une deuxième couche de 5 mm d'épaisseur (b) : densité = 0.77 (d3)
- une troisième couche de 5 mm d'épaisseur (c) : densité = 0.67 (d4)
- une quatrième couche de 10 mm d'épaisseur (d) [a+b] : densité = 0.82 (d2)

Nota : la valeur moyenne de la densité pour ce matériau est de 0.77.

En même temps nous avons séché des échantillons de ces couches pendant 72 heures à 105°C, les résultats nous indiquent un taux d'humidité moyen de 7 %, constant.

Une deuxième détermination de densité a été réalisé, cette fois ci en mesurant tous les millimètres cette variable, de cette façon il est possible de visualiser le profil du panneau et au même temps de contrôler les mesures précédents.

De façon schématique la prise de données a été réalisé comme suite :



Les résultats de ces mesures sont montrés dans la figure suivante :

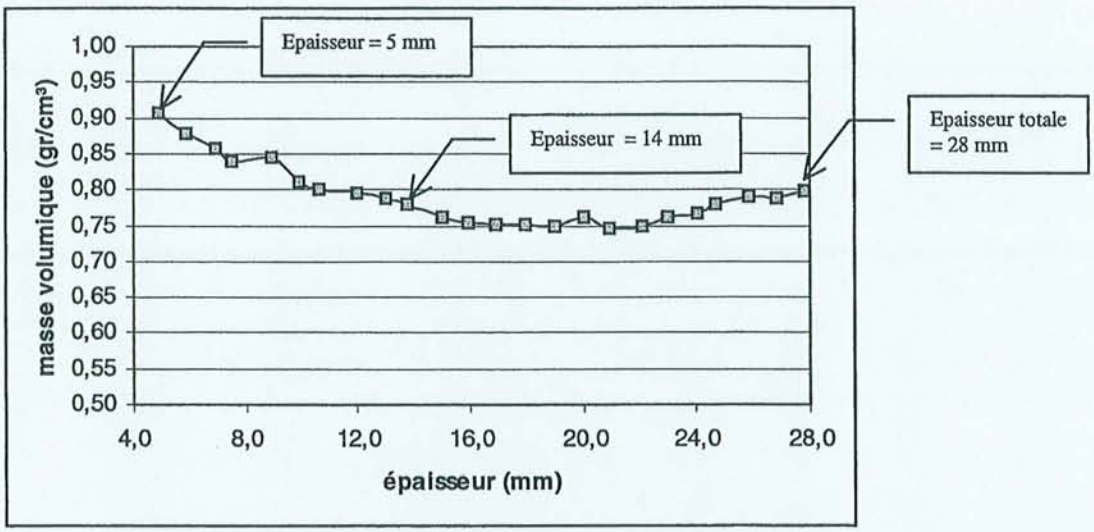


Figure 36 : Evolution de la masse volumique du MDF en fonction de l'épaisseur restante.

Figure 36 on observe que la densité moyenne (épaisseur = 28 mm) correspond à environ 0.8 gr/cm³. En réduisant progressivement l'épaisseur il se produit une diminution de la densité, jusqu'à la partie central du panneau. Ensuite l'enlèvement successif des couches moins denses à partir de cette zone, la valeur de la densité tend à augmenter pour atteindre une valeur de près de 0.90 gr/cm³ pour la section de 5 mm d'épaisseur.

4.3.4. Essais préliminaires de caractérisation de Ke

4.3.4.1. La coupe

Les paramètres de coupe sont définis par la figure 37.

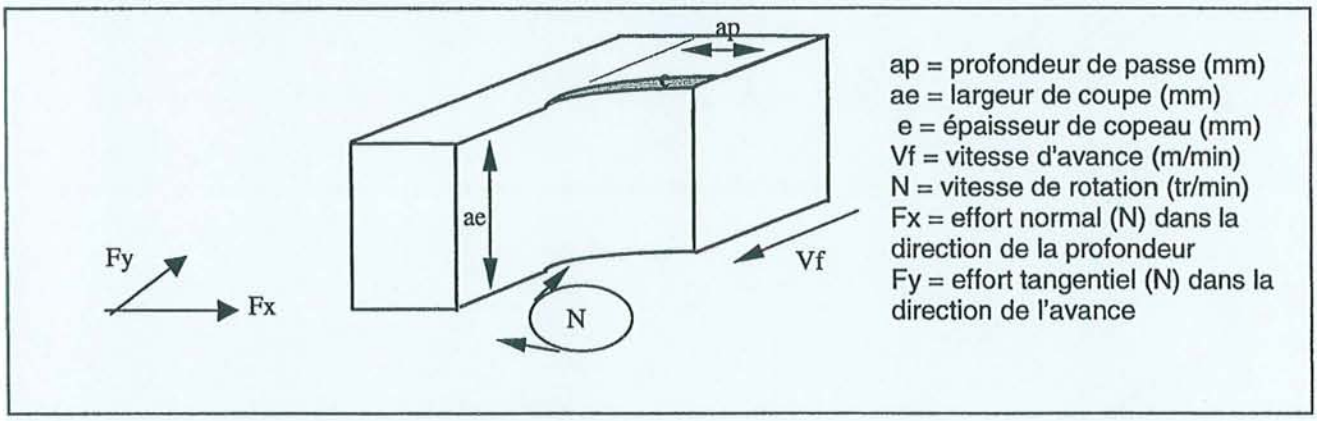


Figure 37 : Les paramètres de coupe.

Nous avons choisi les conditions de coupe suivantes d'après les données techniques issues des catalogues des fabricants d'outil :

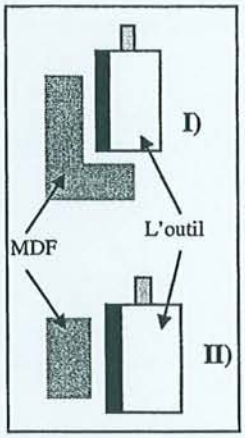
- vitesse de coupe : 4.30 m/s
- profondeur de passe : 2.0 mm
- largeur de coupe : 5.0 mm
- épaisseur du copeau : 0.08 ; 0.16 ; 0.32 mm

4.3.4.2. Les efforts de coupe

Les résultats des mesures des efforts de coupe sont donnés dans la Tableau 3 :

Tableau 3 : Résultats des efforts de coupe.

Type de coupe	**I)**	**II)**
Zone de coupe (a), densité 0.89	**Ke = 1.511**	**Ke = 1.293**
épaisseur de copeau (mm)	efforts de coupe (N)	
0.08	37.15	33.74
0.16	50.51	42.39
0.32	66.17	54.60
Zone de coupe (b), densité 0.77	**Ke = 1.168**	**Ke = 0.832**
épaisseur de copeau (mm)	effort de coupe (N)	
0.08	28.24	22.15
0.16	39.43	25.68
0.32	51.83	37.01
Zone de coupe (c), densité 0.67	**Ke = 0.954**	**Ke = 0.730**
épaisseur de copeau (mm)	effort de coupe (N)	
0.08	24.97	19.08
0.16	30.17	24.14
0.32	41.74	30.71



Sur ce tableau il est possible d'apprécier que la valeur du coefficient d'essence Ke est dépendante de la densité du matériau. Ainsi, une diminution de la valeur de cette variable entraîne un coefficient plus faible pour Ke. Par ailleurs, on constate que un changement du type de coupe de I) *semi-ouverte* à II) *ouverte* a aussi une influence sur Ke. Ce changement de type de coupe génère des efforts de coupe différents qui sont plus importants lorsque la coupe est semi – ouverte par rapport à la coupe ouverte. En plus, les valeurs trouvées pour Ke montrent un comportement stable si on travaille dans une zone à densité constante et pour un changement de l'épaisseur de copeau.

Le profil de densité avec les constantes Ke pour le MDF est montré dans la figure 38.

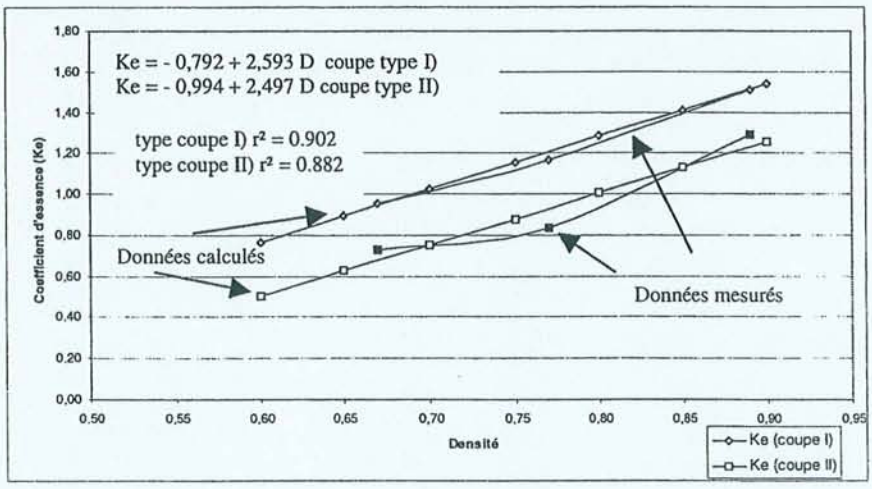


Figure 38: Evolution du coefficient d'essence Ke avec densité locale du MDF.

Il faut indiquer que cette constante Ke représente en fait l'effet combiné de la densité du matériau et, fait important, le type de coupe à laquelle est soumis celui-ci.

Les résultats des efforts de coupe (N) mesurés pour le type de coupe (I) d'après une variation de la densité (d1...d4) et de l'épaisseur de copeau (ec) sont les suivants (figure 39 et Tableau 4):

Tableau 4 : Résultats des efforts de coupe par type de coupe (I), variation de la densité et de l'épaisseur de copeau.

ec (mm)	d1 0.89		d2 densité 0.82	d3 0.77	d4 0.67
0.08	37.15	(N)	36.83	28.24	24.97
0.16	50.51		45.04	39.43	30.17
0.32	66.17		55.57	51.83	41.74

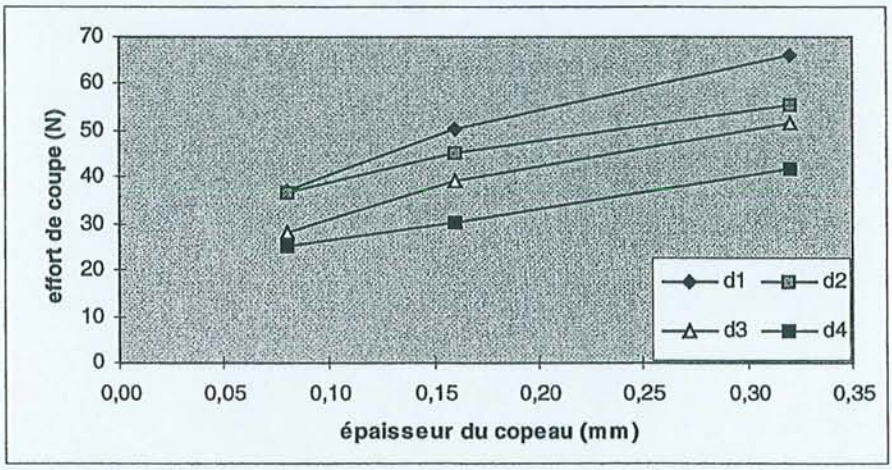


Figure 39 : Efforts de coupe dans des zones de densité différente (type coupe I).

Si nous comparons les résultats des efforts calculées [voir formules (6) et (7) en page 66] avec ceux mesurés (tableau 5), nous pouvons voir que les valeurs sont très proches les unes des autres, donc les valeurs estimées des constantes Ke sont dans une première partie correctes. En plus dans la figure 39 nous constatons qu'avec une augmentation de la densité, les efforts de coupe sont de plus en plus importants. Cette même conclusion est faite avec l'épaisseur de copeau.

Tableau 5 : Les efforts de coupe (N) calculées et mesurées pour type de coupe.

type coupe I)				mesure
densité	ec (mm)	ke	Fc (N)	Fc (N)
0,89	0,08	1,511	40,47	37,15
0,89	0,16	1,511	48,30	50,51
0,89	0,32	1,511	63,97	66,17
0,77	0,08	1,168	31,28	28,24
0,77	0,16	1,168	37,34	39,43
0,77	0,32	1,168	49,45	51,83
0,67	0,08	0,954	25,55	24,97
0,67	0,16	0,954	30,50	30,17
0,67	0,32	0,954	40,39	41,74

type coupe II)				mesure
densité	ec (mm)	ke	Fc (N)	Fc (N)
0,89	0,08	1,293	34,63	33,74
0,89	0,16	1,293	41,33	42,39
0,89	0,32	1,293	54,74	54,60
0,77	0,08	0,832	22,28	22,15
0,77	0,16	0,832	26,60	25,68
0,77	0,32	0,832	35,22	37,01
0,67	0,08	0,730	19,55	19,08
0,67	0,16	0,730	23,34	24,14
0,67	0,32	0,730	30,91	30,71

4.3.4.3. La puissance de coupe

Les essais ont été conduits avec des éprouvettes d'une longueur importante (environ 1.3 m). Ainsi, les résultats sont plus proches des conditions industrielles. Les valeurs mesurées au wattmètre et avec la table traçante présentent une plage de valeurs maximales. La figure 40 montre le comportement de la puissance de coupe dans le temps. La figure 41 indique les valeurs estimées et mesurées de la puissance de coupe maximale montrant le retard due au temps de réponse des matériels de mesure. A partir de ces données, on peut déduire la valeur moyenne qui permet de connaître l'effort de coupe moyen.

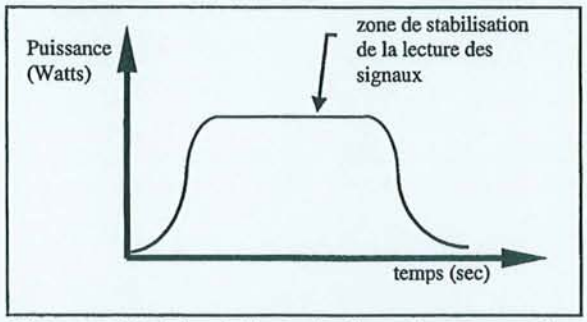


Figure 40: Evolution de la puissance de coupe avec le temps.

La méthode de calcul des puissances de coupe est basé sur le calcul géométrique de l'effort moyen sur la longueur de copeau effectivement enlevée (Tableau 6).

$P_c = Z * N * F_c * \sqrt{ap * D}$ **(6)** avec $F_c = F_o * K_h * K_e * ae$ **(7)** et $F_o = a + b * ec$ **(8)**

Légende P_c : puissance de coupe (W)
Z : nombre des dents
N : vitesse de rotation (tr/min)
F_c : effort de coupe total (N)
K_e : constante d'essence
a et b : coefficients type de coupe
ap : profondeur de passe (mm)
D : diamètre de l'outil (mm)
F_o : effort par cm de largeur du copeau
K_h : constante d'humidité
ae : largeur de coupe (mm)
ec : épaisseur moyenne de copeau (mm)

Tableau 6 : Les valeurs estimés et calculés pour la puissance de coupe.

essai	Pc moy (c)	Pc max (c)	Pc max (m)
a1	21,2	25,3	25,0
a2	25,3	33,5	35,0
a3	33,5	49,9	53,0
b1	16,4	19,5	18,0
b2	19,5	25,9	24,0
b3	25,9	38,6	36,0
c1	13,4	16,0	17,0
c2	16,0	21,1	23,0
c3	21,1	31,5	34,0
(c) = puissance calculée (m) = puissance mesurée			

Nomenclature essais
a = densité 0.89 1 = épaisseur de copeau 0.08 mm
b = densité 0.77 2 = épaisseur de copeau 0.16
c = densité 0.67 3 = épaisseur de copeau 0.32

Nota : La puissance moyenne a été calculée avec l'épaisseur moyenne de copeau et la puissance maximale avec l'épaisseur maximale.

De l'analyse du tableau 6 et de la figure 41, nous pouvons conclure que la détermination de la puissance de coupe au moyen des formules (6),(7) et (8), grâce à la valeur déterminée de Ke, donne des valeurs correctes pour l'estimation des puissances. Ainsi, la puissance maximale de coupe calculée avec l'épaisseur maximale de copeau donne des valeurs très proches des valeurs mesurés avec le wattmètre. De cette façon, il est possible de estimer les valeurs de puissance et des efforts de coupe pour ce matériau sous différents conditions d'usinage.

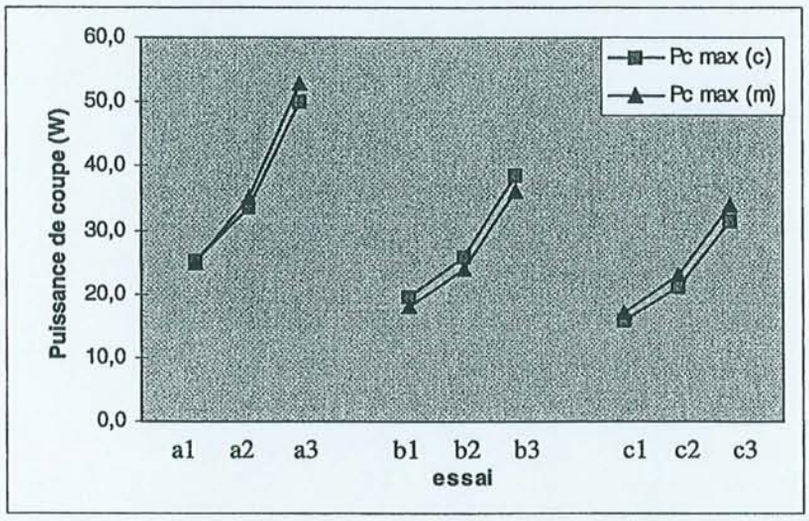


Figure 41 : Les puissances de coupe calculées et mesurées.

4.3.4.4. Les états de surface

Figure 42, l'indice XY représentant le rapport entre l'hauteur des pics et les distances entre pics, est l'indice qui permet de caractériser une surface et autorise la comparaison s'il y a des autres variables en jeu comme conditions de coupe ou densité.

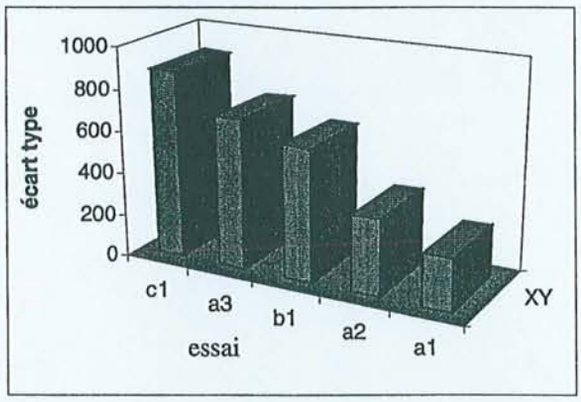


Figure 42 : Le rapport distance entre pics - hauteur des pics « XY ».

Cette figure montre que à densité constante (a1 et a2), si l'épaisseur moyenne de copeau augmente (a1 = 0.08 ; a2 = 0.16 mm), la qualité de la surface se dégrade.

Figure 43, nous constatons que dans la mesure où nous faisons augmenter l'épaisseur de copeau (a1= 0.08 ; a2 = 0.16 ; a3 = 0.32 mm), l'état de surface résultant décroît en qualité, pour un niveau de densité de 0.89. Les mêmes

tendances sont trouvées pour les autres densités avec des écarts types accentués. Figure 44, l'effet densité est observable avec plus de clarté encore, donc pour un niveau constant d'épaisseur de copeau l'état de surface se dégrade si la densité est faible (a = densité forte; b = moyenne; c = faible). Cet effet est encore plus accentué si nous faisons augmenter l'épaisseur de copeau. Donc, pour un matériau homogène comme l'est le MDF par rapport au bois massif, les facteurs déterminants sur l'état de surface sont l'épaisseur de copeau et la densité, c'est à dire que l'effet combiné entre une forte densité et une faible épaisseur de copeau permettrait de trouver les meilleurs états de surface en termes de rugosité, ondulation et de valeur XY.

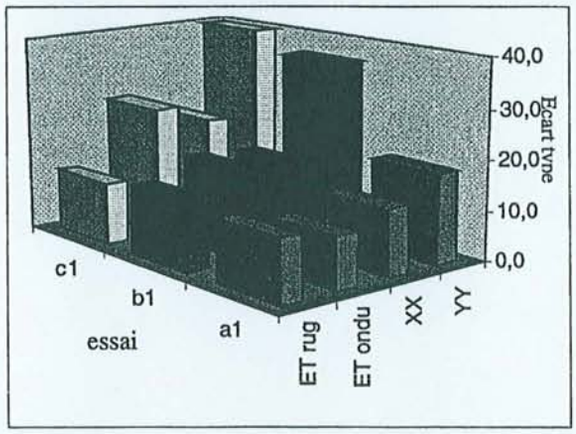


Figure 43 : états de surface pour densité 0.89 et épaisseur de copeau variable.

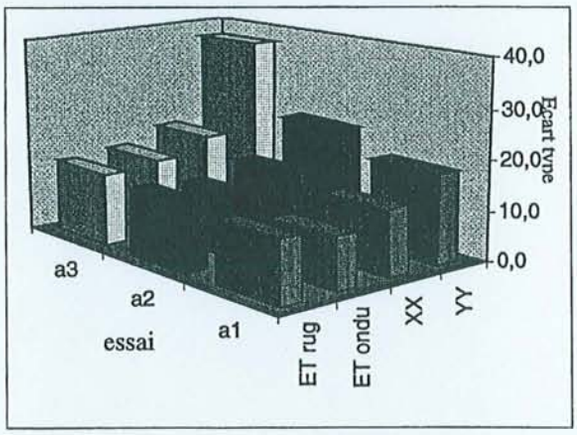


Figure 44 : états de surface pour épaisseur de copeau 0.08 mm et densité variable.

En plus, l'usinage dans les zones de faible densité, dans la partie moyenne du panneau, avec une forte épaisseur de copeau, donne une zone pelucheuse dans la ligne de bordure. Ceci nuit à la recherche d'un bon état de surface. Cette zone pelucheuse peut trouver son origine dans la faible cohésion des fibres et aussi par le fait qu'un forte épaisseur de copeau demande un effort de coupe plus important, il se produit ainsi, un arrachement des fibres lorsque il y a un changement de direction.

CONCLUSION

a) Il est très difficile d'avoir un indice général de la valeur de la constante d'essence Ke pour le MDF. Pour un usinage d'une partie du chant, il faut bien connaître le comportement de cette constante afin d'estimer convenablement les résultats pour des objectifs souhaités.
b) La valeur de Ke est bien estimée dans chaque zone du profil du MDF. La valeur des efforts et des puissances de coupe est bien vérifiée par les essais.
c) La simulation des conditions de coupe au moyen d'une bonne détermination de Ke a été tout à fait satisfaisante au regard des essais effectués.
d) L'usinage du MDF en zones de densité différente est corrélé avec la bibliographie pour les aspects d'état de surface. Il est souhaitable de faire l'usinage en zones de forte densité ou dans tout le profil pour empêcher la formation d'une bordure pelucheuse.
e) Touts ces résultats sont d'un remarquable intérêt pour mener au but l'application de la méthode Couple Outil Matière. Il s'agit dans la suite de trouver les conditions acceptables de la coupe de ce matériau pour une durée de vie maximale de l'outil.

4.4. Démarche expérimentale

4.4.1. Conditions générales

Tout d'abord nous avons travaillé à la recherche d'un point de fonctionnement. Cet l'essai de qualification permet d'assurer la compatibilité entre la matière et les conditions d'usinage et ainsi de trouver le point de départ de séries d'essais. Il faut définir donc:

- la vitesse de coupe V_c (m/min) ou la vitesse de rotation N (tr/min),
- l'avance par dent f_z (mm),
- la profondeur de passe (mm),
- et la largeur de coupe (mm).

Pour les essais nous découperons les planches du MDF de la façon suivante (Figure 45) :

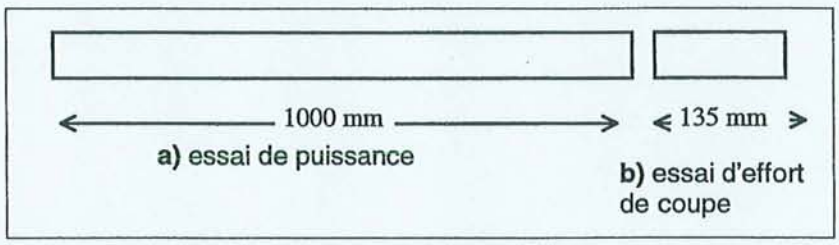


Figure 45 : Découpage des échantillons.

Les conditions limites d'usinage sont fixées à partir des considérations ci dessous.

De manière usuelles dans l'industrie, la coupe avec des machines CNC est caractérisée par de faibles vitesses de coupe et une avance par dent importante. Pour notre travail de recherche, les conditions aux limites seront comprises entre les valeurs suivantes :

- vitesse de rotation = 1800 à 12500 tr/min,
- vitesse de coupe = 1.3 à 8.1 m/sec,
- vitesse d'avance = 1 à 12 m/min,
- profondeur de passe = 1 à 14 mm,
- largeur de coupe = 1 à 30 mm.

Le plan d'expérience de Taguchi a été choisi. La première étape consiste à choisir les paramètres d'usinage. Le but est de définir le domaine de fonctionnement de l'outil de coupe sous certaines conditions d'usinage et pour un matériau connu (densité et humidité). Ce domaine prendra en compte les contraintes d'état de surface et les caractéristiques de la machine – outil. Rappelons qu'il est caractérisé par trois paramètres :

- la profondeur de passe "ap",
- l'avance par dent "f_z",
- la vitesse de coupe "V_c".

Le diagramme cause - effet présenté dans la figure 46 présente les constantes qui ont un poids significatif sur la détermination des essais.

Le programme d'essais suivant la norme du COM doit comprendre au moins les étapes suivantes :

a) essai de qualification,
b) détermination de V_{cmin},
c) détermination de la plage $e_{Cmin} - e_{Cmax}$,
d) détermination des données limites,
e) essai d'usure,
f) détermination des paramètres auxiliaires.

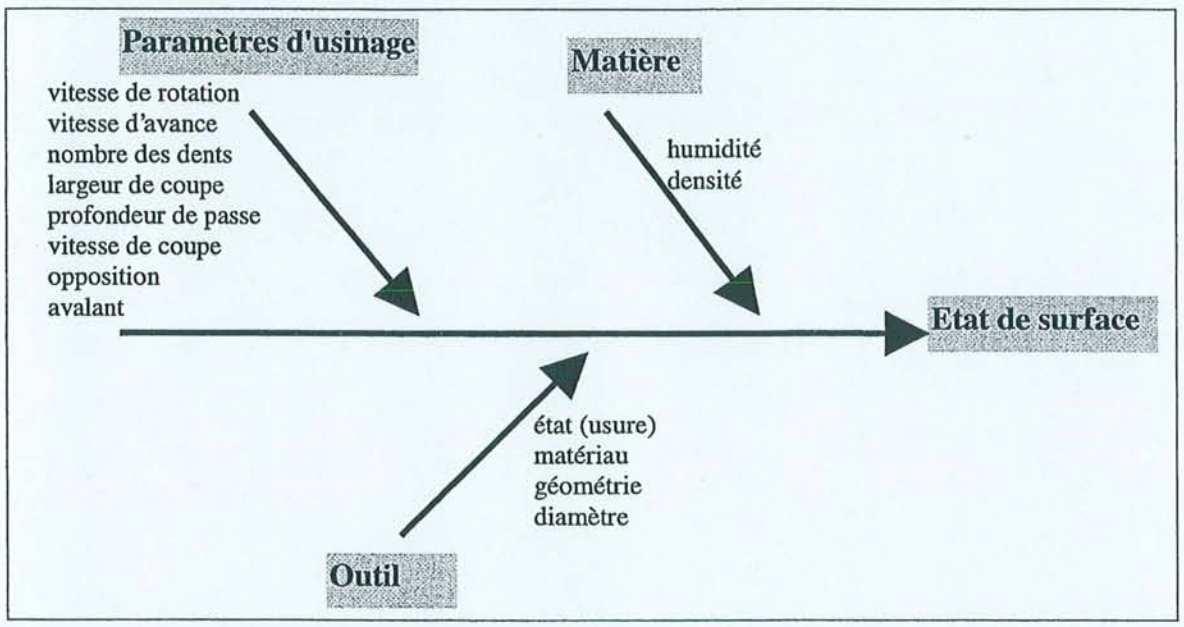


Figure 46 : Diagramme cause - effet.

4.4.2. Essai de qualification

Tout d'abord, il faut trouver un point de fonctionnement à utiliser comme point de départ pour la série d'essais du programme. Il permettra de déterminer le domaine de validité recherché (V_c, f_z, ap). Nous avons fixé les paramètres suivants:

- profondeur de passe, limite outil 14 mm
- largeur de coupe, limite outil 30 mm

Nous pouvons définir le point de fonctionnement de la manière suivante:

- C'est un point de départ (en termes de conditions de coupe), qui doit être stable lorsque les paramètres varient dans une faible amplitude,
- Sa détermination est empirique lorsque le matériau et ses conditions d'usinage sont inconnus,
- Sa détermination peut se faire de façon quantitative à partir d'une série d'essais pour déterminer les ordres de grandeur des conditions initiales de coupe.

Les limites du domaine de validité sont représentés par:

- les paramètres limites de coupe (PLC), c'est à dire la vitesse de coupe, l'épaisseur du copeau, la profondeur de passe et la largeur de coupe,
- les paramètres de liaison (PLI), dont la section maximale de copeau et le débit maximal admissible.

Nous avons travaillé à une détermination quantitative du point de fonctionnement. Les paramètres limites de coupe comme bornes minimales et maximales de variation pour chaque paramètre de coupe ont été pris en compte, en travaillant avec des conditions proches de l'usinage dit normal, pour limiter le nombre d'essais.

La sélection du point de fonctionnement a été déterminé en considérant l'épaisseur moyenne du copeau et l'avance par dent, et son influence sur l'évolution du travail spécifique de coupe et sur l'état de surface résultant. Nous avons choisie un tableau Taguchi L9(3^3) pour planifier nos expériences.

Ainsi nous avons:

* les facteurs en jeu:	* les niveaux:
- vitesse de coupe "Vc"	2.9; 4.4; 7.3 m/s
- avance par dent "f_z"	0.15; 0.30; 0.75 mm
- profondeur de passe "ap"	2; 3; 4 mm
- largeur de coupe "ae"	10 mm constante

Le tableau de Taguchi correspondant est fixé ci dessous :

	Facteurs		
essai	Vc	fz	ap
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

4.4.3. Détermination de Vc_{min}

L'objectif est de trouver la vitesse de coupe en dessous de laquelle l'usinage pose des problèmes. Comme à cette étape nous connaissons déjà la vitesse de coupe du point de fonctionnement, nous la faisons augmenter de 20%, ensuite il faut faire plusieurs passes en la diminuant et nous traçons un graphique V_c – Wsp (figure 47a et 47b), alors nous fixons $V_{c_{min}}$ dans le point où Wsp croître brusquement à une vitesse légèrement supérieure.
Comme point de départ il faut travailler avec ap, ae et f_z du point de fonctionnement.

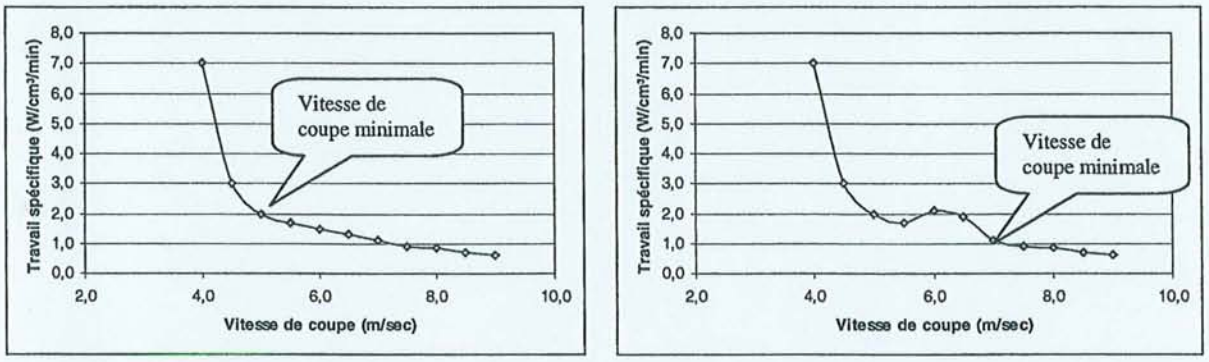


Figure 47 : Courbes type pour la détermination de la vitesse de coupe minimale, d'après les normes AFNOR.

4.4.4. Détermination de l'épaisseur de copeau minimale et maximale

Une fois trouvée la vitesse de coupe minimale ($V_{c_{min}}$), nous procédons à la détermination de l'épaisseur de copeau minimale et maximale. Il faut considérer comme point de départ l'engagement radial « ap » et l'engagement tangentiel « ae » du point de fonctionnement et la vitesse de coupe $V_c \geq V_{c_{min}}$, nous réalisons une série d'essais couvrant une plage d'épaisseurs de copeau incluant l'épaisseur de copeau du point de fonctionnement. Donc il faut faire diminuer progressivement l'épaisseur de copeau tout en gardant les conditions de coupe constantes. Nous trouvons l'épaisseur de copeau minimale lorsque se produit le décrochement de la courbe du travail spécifique. La figure 48a et 48b montre des exemples de courbe.

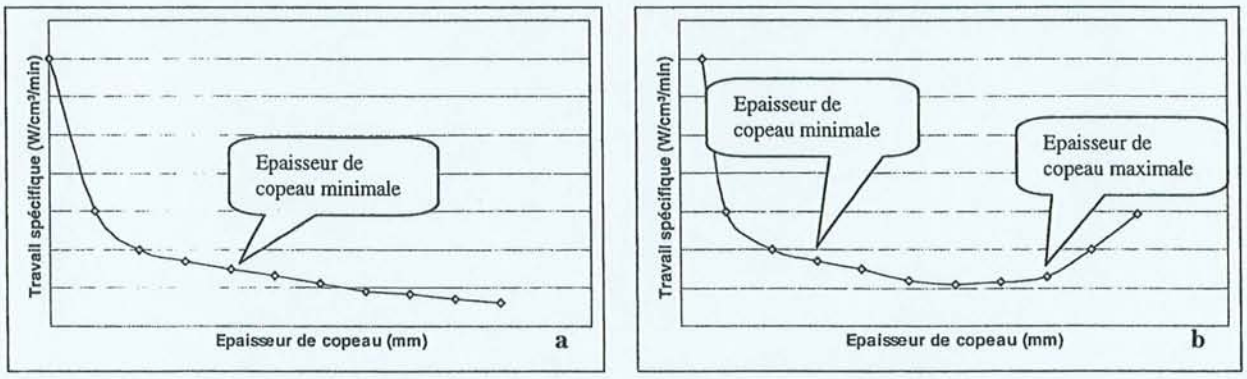


Figure 48 : Courbes-type pour la détermination de l'épaisseur de copeau minimale (a) et maximale (b).

4.4.5. Détermination des données limites

* **La section maximale coupée (A_{dmax}):** il faut prendre comme point de départ les paramètres suivants:

- ap = ap du point de fonctionnement
- ae = ae du point de fonctionnement
- $V_c \geq V_{c_{min}}$
- ec $\geq$ ec_{min}

Ensuite réaliser une série d'essais en faisant évoluer ap et/ou ae afin de déterminer A_{Dmax}. La relation permettant d'obtenir A_D est la suivante:

$$A_D = ap * ae$$

Afin de travailler avec la densité constante, nous avons choisi de laisser la largeur de coupe « ae » fixe, donc pour la détermination de la section de coupe, il nous reste à connaître la profondeur de passe « ap » limite.

Nous traçons les graphiques de travail spécifique – profondeur de passe ou état de surface – profondeur de passe, où il faut voir le comportement des courbes, lorsque nous détectons un changement anormal ; par exemple une chute suivie d'une montée de la courbe : cela donnera le point limite.

* **Le débit maximum :** les points de départ pour trouver Q_{max} sont:

- ap = ap obtenu pour A_{Dmax}
- ae = ae obtenu pour A_{Dmax}
- V_c = V_c utilisé pour A_{Dmax}
- ec = ec utilisé pour A_{Dmax}

Le premier essai consiste à faire augmenter l'épaisseur de copeau jusqu'à sa valeur maximale. Si cette valeur est atteinte sans trouver le débit maximum, il faut augmenter la vitesse de coupe sous épaisseur de copeau maximale.

La relation qui permet d'obtenir le débit est :

$$Q = A_D * Vf$$

Où Q = le débit en cm^3/min
A_D = la section de coupe en mm^2
Vf = la vitesse d'avance en m/min

Comme les essais précédents, il faut tracer des graphiques montrant l'évolution du travail spécifique par rapport au changement du débit de coupe et aussi de l'état de surface. Donc, lorsqu'il se produit un décrochement de ces courbes, le point où se trouve le débit maximum est trouvé.

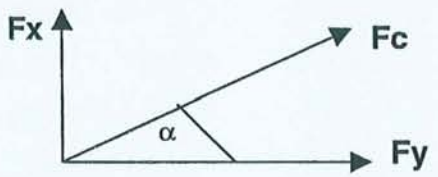
4.4.6. Essai d'usure

Dans cette partie des essais, nous nous éloignons de la norme et ainsi du modèle de Taylor proposé, car ce modèle a été développé pour la coupe des métaux. Il n'existe pas d'indices nous permettant de connaître la valeur de ces constantes pour le matériau bois, et en plus il est difficile de réaliser la comparaison entre un matériau métallique homogène et le matériau bois caractérisé pour son hétérogénéité.

Les méthodes de mesure du recul de l'arête de coupe par profilomètre ou par vision ne nous permettent pas de quantifier facilement cette valeur. Ainsi nous nous intéressons à l'étude de l'usure par le comportement de l'effort de coupe, plus spécifiquement par le rapport angulaire de ses composantes.

Nous avons fait une série d'essais où les conditions de coupe sont dans le domaine de validité. Tous les paramètres de coupe restent constants. Ainsi, nous mesurons l'effort de coupe, la puissance et l'état de surface sur une distance de coupe approprié.

Donc cette série d'essais comporte des conditions constantes de coupe qui respectent les résultats des essais précédents, nous mesurons les efforts de coupe chaque 200 m (de même que la puissance et l'état de surface) afin de calculer l'angle de la façon suivante :



$$Tg\ \alpha = Fx / Fy$$

$$\alpha = ArcTg\ Fx / Fy$$

Ensuite, nous traçons un graphique montrant l'évolution de cet angle par rapport à la distance de coupe. Nous espérons retrouver les trois zones de travail d'un outil au cours de sa vie entre deux séquences d'affûtage :

- rodage
- usure linéaire (zone de stabilité)
- effondrement de l'arête (mauvaises conditions de travail).

V. RESULTATS

5.1. Recherche du point de fonctionnement.

- 5.1.1. Les efforts de coupe.
- 5.1.2. La puissance de coupe.
- 5.1.3. L'analyse des surfaces.
- 5.1.4. Analyse des réponses dues à l'état de surface.

5.2. La vitesse de coupe minimale.

- 5.2.1. Les efforts de coupe.
- 5.2.2. La puissance de coupe.
- 5.2.3. L'analyse des surfaces.

5.3. L'épaisseur de copeau minimum et maximum.

- 5.3.1. L'effort de coupe.
- 5.3.2. La puissance de coupe.
- 5.3.3. L'analyse des surfaces.

5.4. Les données limites.

- 5.4.1. Section maximale de coupe.
- 5.4.2. Le débit maximum de coupe.

5.5. Essais d'usure.

- 5.5.1. Etat de l'art.
- 5.5.2. Méthodologie.
- 5.5.3. Résultats.

5.6. Essai de détermination des paramètres auxiliaires.

5.7. Résumé des résultats.

V. RESULTATS

5.1. Recherche du point de fonctionnement

5.1.1. Les efforts de coupe

Nous avons établi un plan d'expérience Taguchi, qui nous a permis de réduire le nombre d'expériences à réaliser. Ainsi, le nombre d'essais, au nombre de neuf, est basé sur la variation de la vitesse de coupe, la profondeur de passe et l'avance par dent en 3 niveaux :

	Niveau		
Facteur	1	2	3
Vitesse de coupe	2.9	4.4	7.3 m/s
Profondeur de passe	2.0	3.0	4.0 mm
Avance par dent	0.15	0.30	0.75 mm

Les efforts de coupe ont été mesurés et exprimés de la manière suivante (Ils seront par la suite toujours calculées comme ici):

⇨ pour chaque condition particulière de coupe, 4 répétitions ont été réalisées
⇨ pour chaque mesure 6 pics dans la direction de l'avance (Fy) et de la direction de coupe (Fx) (figure 49)
⇨ la valeur moyenne des 24 pics de chaque essai (Fx et Fy), est considérée pour calculer l'effort de coupe « Fc ».

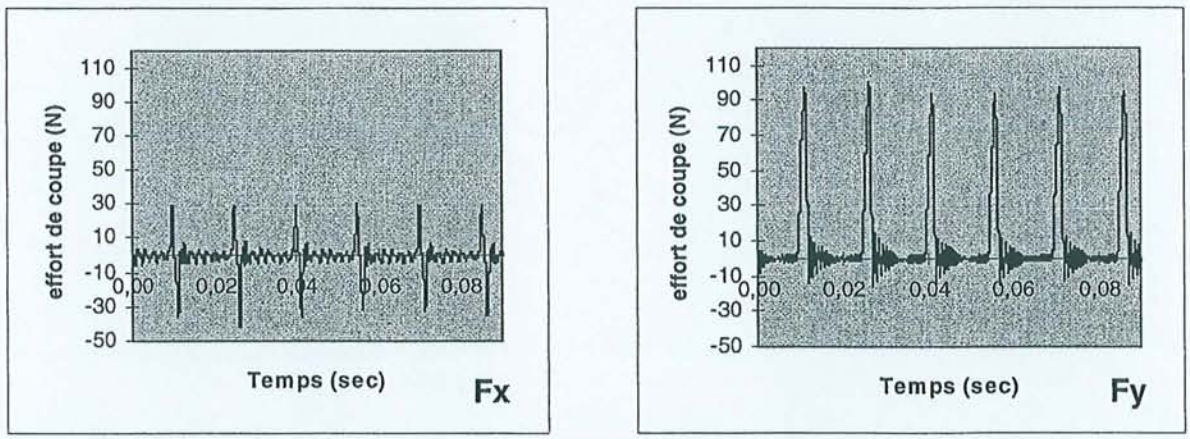
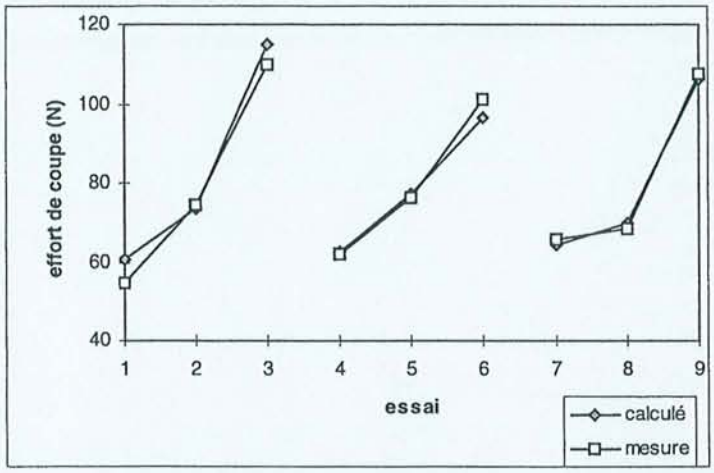


Figure 49 : Exemple ; efforts de coupe dans la direction de coupe Fx et d'avance Fy.

A partir de la figure 50, il est clair que nous sommes arrivés à obtenir des mesures correctes des efforts de coupe pour chaque condition particulier d'usinage. Les écarts sont très faibles et non significatifs. En plus, nous pouvons observer les effets de :

- la densité constante du MDF,
- l'épaisseur de copeau, et
- l'avance par dent.

Nous constatons que l'effet le plus important est l'épaisseur de copeau puisque pour un profondeur de passe variable et une avance par dent constante comme par exemple dans les essais 3 - 6 - 9, les efforts de coupe mesurés sont en étroit rapport avec l'épaisseur de copeau.



Essai	Facteur Vc	fz	ap
1	2.9	0.15	2.0
2	2.9	0.30	3.0
3	2.9	0.75	4.0
4	4.4	0.15	3.0
5	4.4	0.30	4.0
6	4.4	0.75	2.0
7	7.3	0.15	4.0
8	7.3	0.30	2.0
9	7.3	0.75	3.0

Figure 50 : efforts de coupe (N) calculés et mesurés (cf. annexe 9.2.).

5.1.2. La puissance de coupe

Pour les mêmes essais des efforts de coupe nous avons fait la mesure de puissance sur une éprouvette d'une longueur d'un mètre, dont nous pouvons suivre avec plus de précision l'évolution de nos mesures. Les mesures de puissance permettent de connaître les écarts par rapport à nos mesures des efforts de coupe et ainsi de vérifier les mesures. Ainsi, les résultats en terme de puissance (figure 51) et travail spécifique (figure 52) par rapport aux mesures des efforts de coupe sont les suivantes:

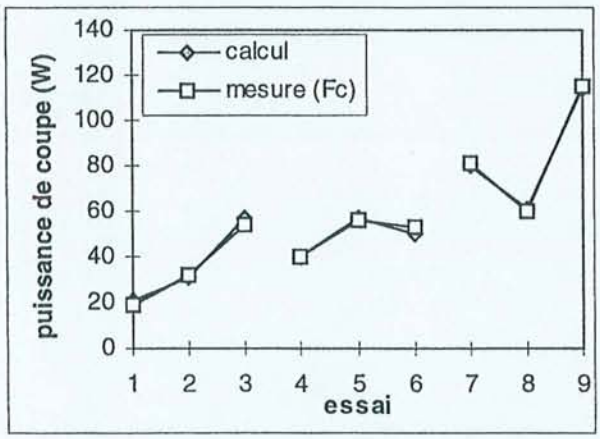


Figure 51: Rapport puissance de coupe (W) calculée et mesurée.

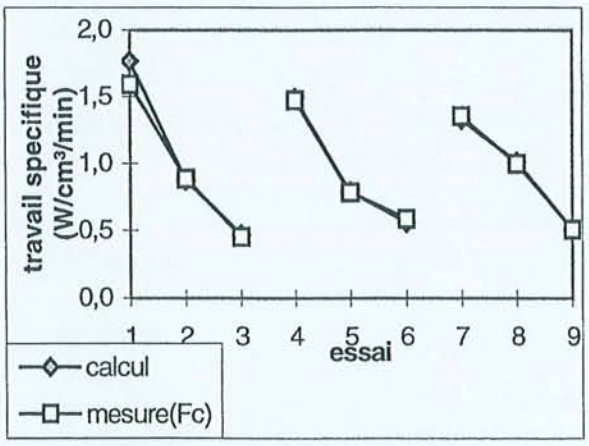


Figure 52: Rapport travail spécifique (W/cm³/min) calculée et mesurée.

Il faut noter que les puissances mesurées avec le wattmètre correspondent aux puissances maximales, donc avec un épaisseur de copeau maximale. Les résultats

entre la puissance mesurée et la puissance calculée à partir de l'épaisseur maximale de copeau sont les suivantes (figures 53 et 54 pour le travail spécifique) :

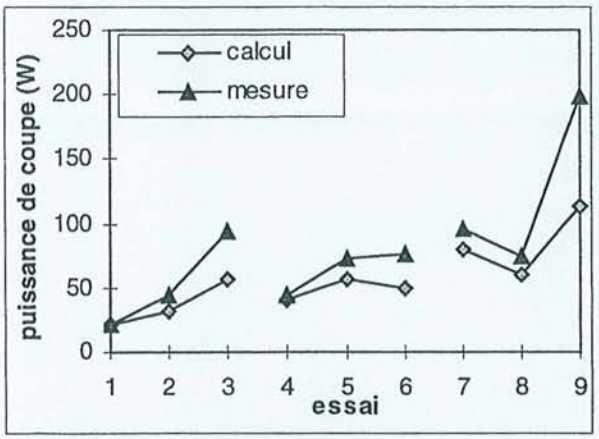


Figure 53 : Puissances de coupe (W) mesurées et calculées avec e_{max}.

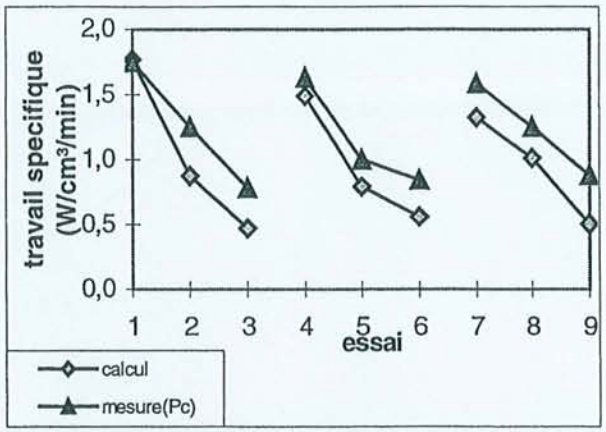


Figure 54 : Travail spécifique de coupe (W/cm³/min) mesurées et calculées avec e_{max}.

Donc, en faisant la mesure des puissances de coupe (maximales), nous pouvons faire son estimation et en déduire la valeur moyenne à partir des données d'épaisseur de copeau maximale ou à partir des mesures des efforts de coupe.

L'analyse des résultats pour la réponse effort de coupe (N) est montré dans le graphique des réponses suivant (figure 55):

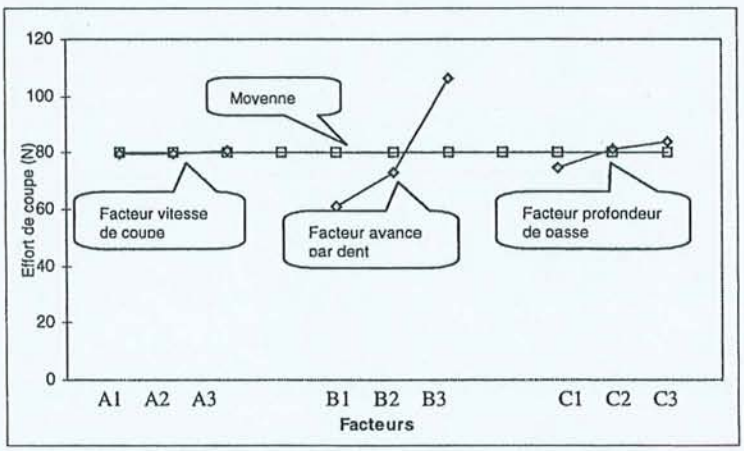


Figure 55 : Graphique des réponses pour les efforts de coupe.

Sur ce graphique, nous constatons que les facteurs A (vitesse de coupe) et C (profondeur de passe) montrent une réponse non significative tandis que le facteur B est significatif. Donc le facteur B, c'est à dire l'avance par dent (fz) est le facteur le plus déterminant sur les réponses des efforts de coupe. Cependant, la question est de savoir quel niveau de vitesse de coupe nous convient pour trouver le point de fonctionnement en vue de considérer ce facteur pour les essais suivants. Il nous faudra faire l'analyse pour les réponses état de surface, qui semblent donner des résultats corrects en termes de vitesse de coupe.

5.1.3. L'analyse des surfaces

Pour une largeur de coupe "ae" = 10.0 mm on trouve, une première zone de 5 mm avec une densité de 0.89 et une deuxième zone de 5 mm avec une densité de 0.77. La mesure a été faite en deux parties (zone 1; zone 2). Les résultats sont exprimés en termes d'écart type brut, d'ondulation, de rugosité et de distances entre pics et de hauteur des pics. Ces résultats montrent des écarts moins importants pour la zone la plus dense que pour la zone moins dense. La tendance générale donne un écart plus important si l'avance par dent l'est aussi. Par contre, pour les valeurs de XX et YY, il n'y a pas de tendances très nettes entre les essais. Dans les figures 56 à 59 nous pouvons voir l'évolution des écarts pour les deux zones de densité :

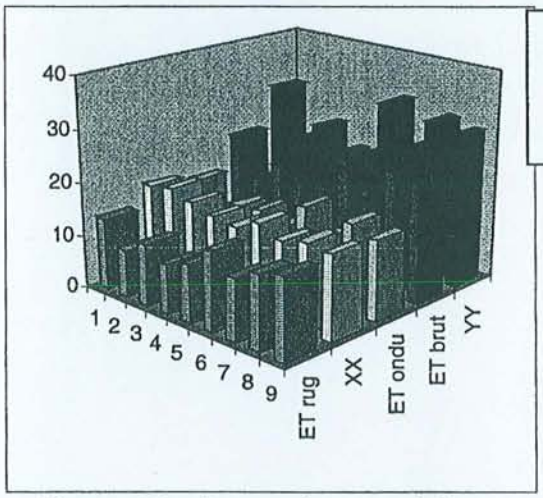


Figure 56 : écarts de rugosité et ondulation pour zone de densité 0.89

Essai	Vc	Facteur fz	ap	Essai	Vc	Facteur fz	ap
1	2.9	0.15	2.0	6	4.4	0.75	2.0
2	2.9	0.30	3.0	7	7.3	0.15	4.0
3	2.9	0.75	4.0	8	7.3	0.30	2.0
4	4.4	0.15	3.0	9	7.3	0.75	3.0
5	4.4	0.30	4.0				

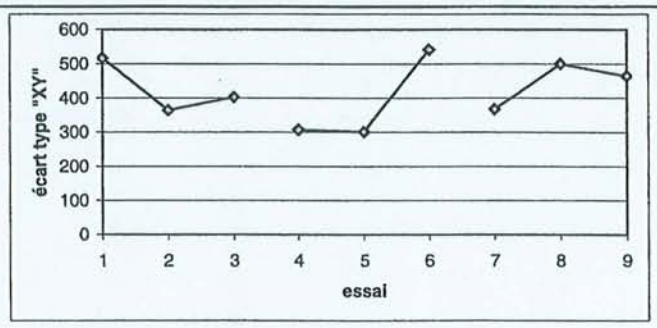


Figure 57 : écart type « XY » pour densité 0.89

Nous pouvons voir une tendance d'augmentation des écarts donc de détérioration de la qualité de la surface si nous faisons augmenter l'avance par dent donc l'épaisseur de copeau.

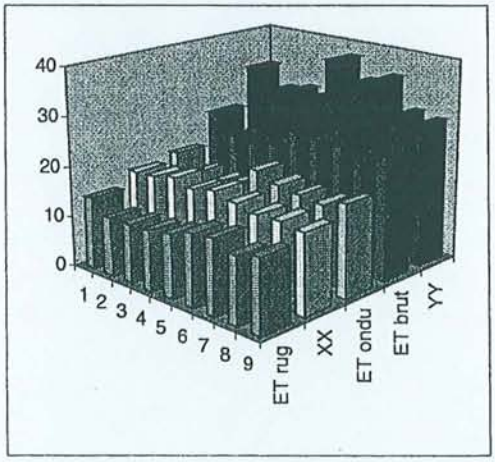


Figure 58 : écarts de rugosité et ondulation pour zone de densité 0.77

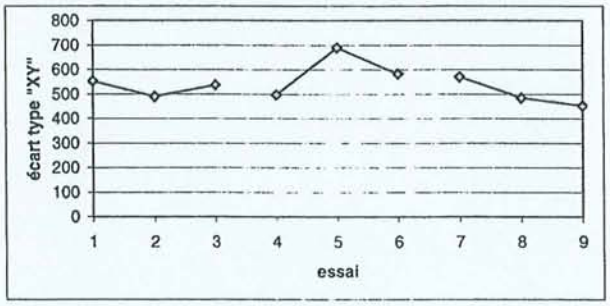


Figure 59 : écarts type « XY » pour densité 0.77

Ces figures montrent des niveaux des écarts légèrement plus accentuées, ce qui est tout à fait normal dans une zone de densité plus faible du fait de la moins importantes cohésion des fibres.

5.1.4. Analyse des réponses dues à l'état de surface

Nous avons sélectionné pour chacun des trois facteurs, 3 niveaux différents pour couvrir l'ensemble de possibilités dues à la vitesse de rotation permise par la machine.

Une deuxième analyse a donc été faite en termes d'état de surface qui nous donne une réponse plus claire. Nous pensons que le choix doit être orienté vers la maximisation des réponses « état de surface ». De cette façon, nous pouvons établir clairement tous les paramètres nous permettant de poursuivre nos essais pour trouver la vitesse de coupe minimale. La figure 60 montre les résultats du plan d'expérience en considérant l'état de surface (écart XY).

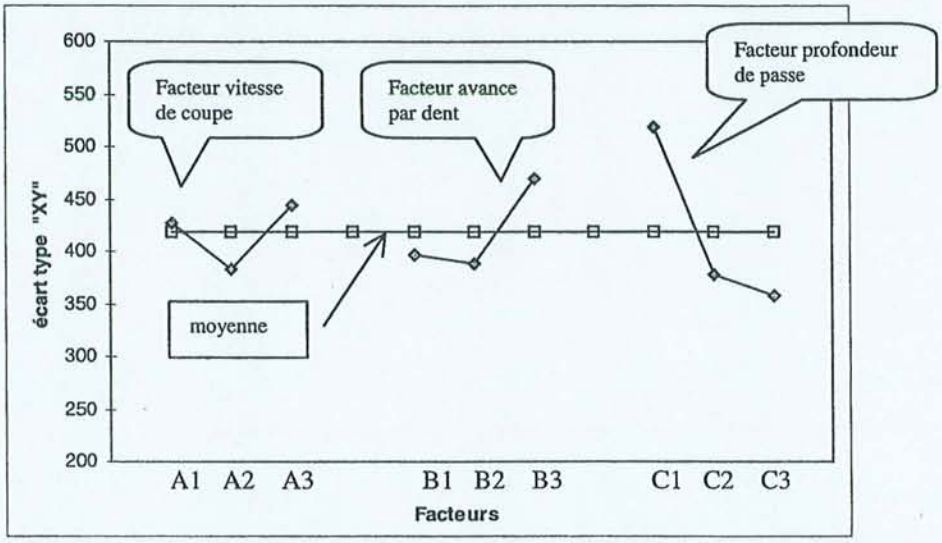


Figure 60 : Analyse des réponses pour l'état de surface « XY ».

Dans cette figure nous constatons qu'il n'existe pas de différences significatives entre les facteurs A1 et A3 ; entre B1 et B2 ; et entre C2 et C3. Nous allons sélectionner les facteurs qui ont pour critère la maximisation des réponses. Ainsi, les points de référence pour la suite de nos essais vont être les suivants :

Facteur	Niveau	magnitude
(A) Vitesse de coupe	3	7.17 m/sec
(B) Avance par dent	3	0.75 mm
(C) Profondeur de passe	1	2.0 mm

D'après les résultats obtenus, nous pouvons maintenant établir notre point de départ pour la suite de nos essais. Ainsi, nous avons des résultats tout à fait cohérents entre les mesures de puissance et d'effort de coupe. Ceci nous permet de faire des mesures d'efforts de coupe et de les contrôler avec quelques mesures de puissance. De cette façon, nous trouvons des valeurs beaucoup plus précises en faisant la détermination du travail spécifique de coupe à partir des mesures des efforts de coupe.

Les résultats des états de surface sont en accord avec nos prévisions. L'épaisseur de copeau et l'avance par dent vont donc être déterminants sur la qualité de la surface. De plus, il faut ajouter la variable densité : avec une densité plus faible, l'état de surface sera dégradée, donnant une augmentation des écarts types.

Le plan d'expérience nous a permis de trouver la variable la plus significative pour faire le choix de nos essais. De cette façon, l'épaisseur de copeau atteindra une valeur entre 0.3 et 0.4 mm ; ce qui est tout à fait convenable.

Il faut noter que la largeur de coupe varie de 10.0 mm à 5.0 mm dans les essais suivants, car travailler avec une largeur de coupe plus réduite nous permet de mieux contrôler la qualité de surface due à la différence de densités présentes dans les 10 mm. En plus, le changement de ce paramètre n'affecte pas le déroulement des essais car il influe seulement l'effort de coupe de façon proportionnelle.

Au niveau état de surface et en considérant une condition sélectionnée de fz = 0.75 mm, cela nous donne un état de surface de mauvaise qualité, mais en faisant diminuer la vitesse de coupe et l'épaisseur de copeau, nous arriverons à trouver une vitesse de coupe minimale qui donnera un état de surface de bonne qualité.

UNIVERSITÉ NANCY 1 BIBLIOTHÈQUE SCIENCES

5.2. La vitesse de coupe minimale Vc_{min}

C'est le point de fonctionnement donnant les conditions de coupe de départ pour faire la recherche de la vitesse de coupe minimale, donc la plage des conditions de coupe où se produit le travail « normal » de la machine sur la matière. Les conditions sélectionnées sont les suivantes :

La vitesse de coupe augmentée de 20 % = 8.61 m/sec
Profondeur de passe ap = 2.0 mm
Largeur de coupe ae = 5.0 mm
Avance par dent fz = 0.75 mm

Nous avons diminué progressivement la vitesse de coupe tout en gardant l'engagement radial et tangentiel constant ; cependant, l'avance par dent à dû être aussi diminué progressivement de façon à trouver un graphique d'augmentation du travail spécifique en fonction de la diminution de la vitesse de coupe.

5.2.1. Les efforts de coupe

Nous avons travaillé avec onze points de contrôle. Sur chacun, nous faisons la mesure des efforts de coupe, puissance et état de surface. Ainsi si nous traçons une graphique vitesse de coupe – travail spécifique, le résultat est représenté sur la figure 61.

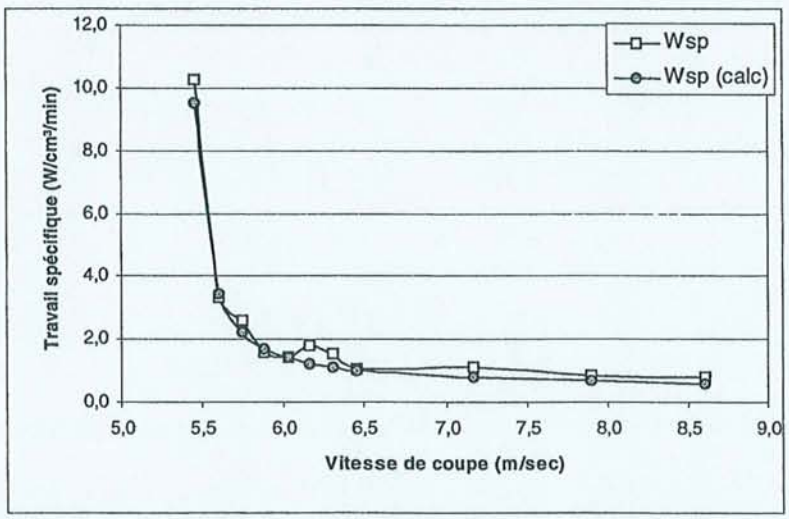


Figure 61 : Evolution du travail spécifique en fonction de la vitesse de coupe par la mesure des efforts.

Dans cette figure, nous pouvons distinguer la courbe théorique du travail spécifique et son évolution en augmentation lorsque la vitesse de coupe diminue. Sur cette courbe nous traçons la courbe résultat pour nos mesures des efforts de coupe, donc nous pouvons observer un comportement similaire entre les deux courbes. Cependant, nous observons très clairement un point où se produit le décrochement, qui se situe à une vitesse de coupe de 6.46 m/sec. Ainsi, pour l'analyse des efforts de coupe, nous trouvons, en dessous de cette vitesse, qu'il se produit un phénomène perturbateur qui affecte l'usinage avec une augmentation anormale du travail spécifique. Les écarts - type que nous avons trouvé montrent une erreur entre

1,5 et 4,5 % pour le points mesurés. Pour avoir une conclusion plus claire, il faut connaître le comportement de la puissance de coupe et de l'état de surface.

5.2.2. La puissance de coupe

Nous avons contrôlé la puissance de coupe dans la zone où se trouve le changement de pente de la courbe montré dans la figure 61. Les résultats sont dans la figure suivante :

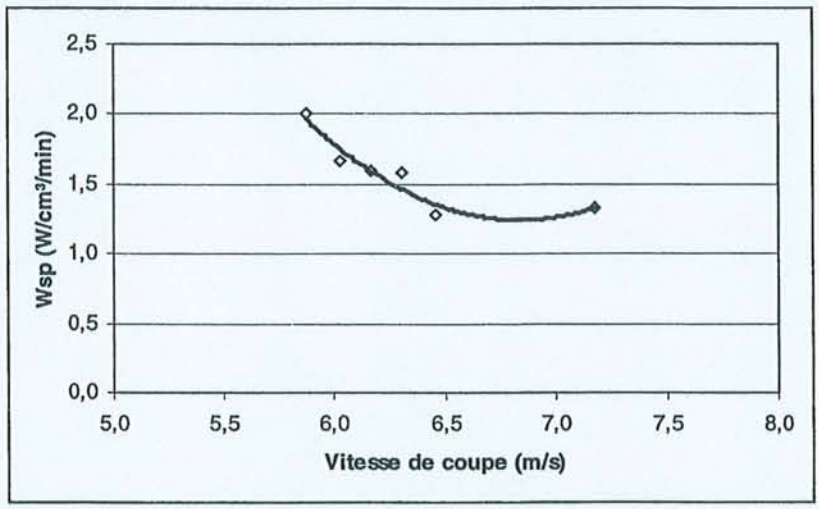


Figure 62 : Variation du travail spécifique en fonction de la vitesse de coupe, par la mesure de la puissance de coupe.

Ici, nous pouvons voir qu'effectivement il y a une altération du travail spécifique en-dessous d'une vitesse de coupe de 6.5 m/sec, avec une augmentation brusque de la puissance de coupe. Les écarts - type pour les mesures de puissance montrent une erreur inférieure à 5 %.

5.2.3. L'état de surface

Nous avons mesuré l'état de surface avec l'indice du type « XY », le rapport entre les creux et les pics. Les résultats sont dans la figure 63.

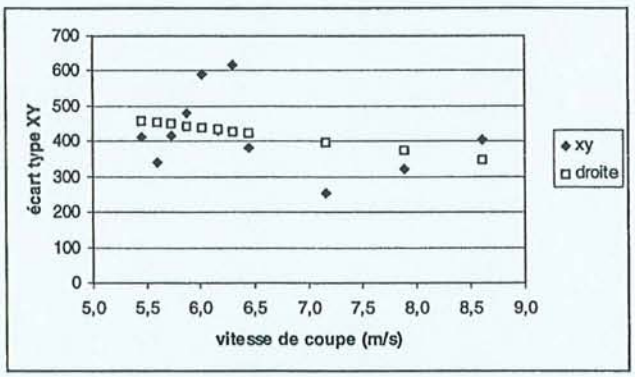


Figure 63 : L'état de surface en fonction de la vitesse de coupe.

Cette figure montre qu'il existe une forte altération de l'état de surface (une dégradation) qui donne un décrochement de cette courbe à partir d'une vitesse de

coupe de 6.5 m/sec vers les vitesses les plus basses. Ainsi, sous ces conditions d'usinage, la diminution de la vitesse de coupe entraîne la dégradation de l'état de surface.

Le problème a été de fixer une vitesse de coupe où il se produisait un changement du comportement de nos paramètres d'analyse: l'effort de coupe, la puissance et l'état de surface. D'après la norme, les courbes peuvent évoluer de la même manière que les nôtres, mais la bibliographie est presque inexistante dans le matériau bois.

Les trois analyses faites pour trouver le point où se trouve la vitesse de coupe minimale montrent une bonne corrélation, nous permettant d'affirmer que la vitesse limite de travail pour notre outil sur cette matière ne doit pas être inférieure à 6.46 m/sec. En-dessous de cette vitesse nous trouvons pour résultat une augmentation des efforts de coupe, une augmentation de la puissance de coupe et une dégradation de l'état de surface. Le travail à une vitesse supérieure montre une certaine homogénéité pour ces trois paramètres.

Le fait d'avoir diminué progressivement l'avance par dent nous a conduit évidemment à faire diminuer l'épaisseur de copeau. Ainsi, lorsque la vitesse de coupe diminue, le travail spécifique augmente mais cette augmentation est plutôt liée à la diminution de l'épaisseur de copeau. Néanmoins cette diminution est arrêtée à partir du point « vitesse de coupe minimale ». Comment pouvons-nous expliquer ce décrochement ? Nous nous trouvons dans une zone où l'épaisseur de copeau est très petite pour les conditions de coupe choisis. Nous sommes donc hors de notre point de fonctionnement, et pour continuer à travailler dans de conditions acceptables, il faudra trouver un autre COM réglé avec des conditions de coupe pour une épaisseur de copeau plus grande. Le décrochement doit trouver son origine dans le fait que l'outil n'est pas capable de travailler cette matière dans ces conditions et donc génère des problèmes qui sont liées à la quantité d'énergie -plus importante que prévue- qu'il nécessite pour enlever le copeau. Ainsi, pour diminuer cette quantité d'énergie, il faut augmenter l'épaisseur de copeau.

5.3. L'épaisseur de copeau minimale et maximale, e_{min} et e_{max}

Pour procéder à la réalisation de ces essais, nous avons choisi les conditions de coupe suivantes :

Vitesse de coupe minimale Vc_{min} = 6.46 m/sec
Profondeur de passe ap = 2.0 mm
Largeur de coupe ae = 5.0 mm
Epaisseur de copeau ec = 0.42 mm

Nous avons d'abord fait le calcul théorique en prenant les conditions de coupe ci-dessus comme point de départ pour connaître quels seront nos points de contrôle et faire ensuite diminuer progressivement l'épaisseur de copeau au minimum possible, en accord avec nos limites machine. L'objectif est de faire un balayage entre un maximum et minimum en passant par l'épaisseur de copeau du point de fonctionnement. Au-delà de cette limite, nous devons trouver des conditions perturbatrices pour le travail spécifique et l'état de surface.

5.3.1. L'effort de coupe

Dans ces essais, nous avons fait varier uniquement l'épaisseur de copeau, toutes les autres conditions de coupe restant constantes. Nous prenons onze points de contrôle et nous faisons d'abord l'analyse à partir de la mesure des efforts de coupe. Le résultat est exprimé en tant que travail spécifique (cf. annexe 9.2) et nous construisons une courbe de ce paramètre et son rapport avec l'épaisseur de copeau. Nous obtenons le graphique suivant sur la figure 64 :

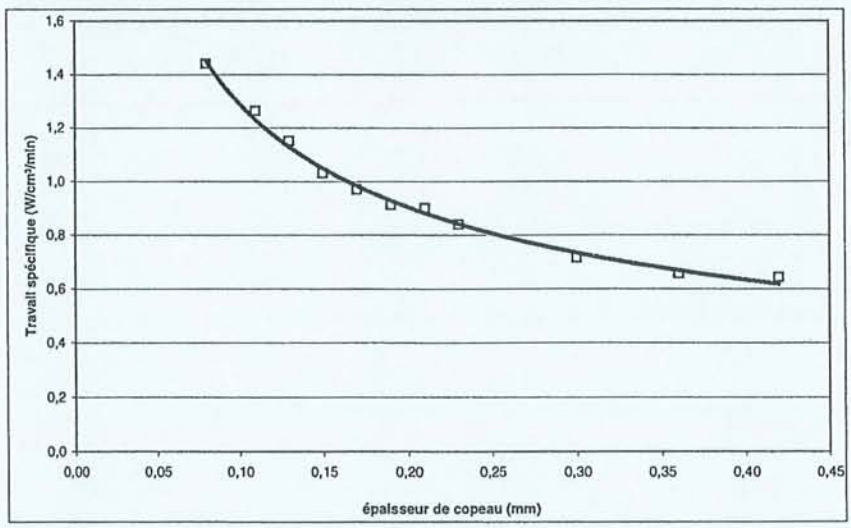


Figure 64 : Evolution du travail spécifique en fonction de l'épaisseur de copeau par mesure d'efforts de coupe.

Nous observons ici, une augmentation régulière du travail spécifique lorsque l'épaisseur de copeau diminue. La courbe ne présente pas un minimum très clair correspondant à l'épaisseur de copeau minimum. Cependant dans cette figure nous nous apercevons qu'entre un épaisseur de copeau de 0.15 à 0.25 mm il y a une

légère altération de la courbe. C'est à cet endroit où il faut approfondir les analyses. L'écart type nous donne une erreur statistique entre 1,8 et 3,3 %.

Nous procédons maintenant à l'analyse de la puissance de coupe et à l'état de surface pour détecter convenablement un point de décrochement où se peut trouver l'épaisseur de copeau minimale.

5.3.2. La puissance de coupe

Les résultats des mesures de puissance, exprimés par le travail spécifique (Wsp), sont dans la figure 65.

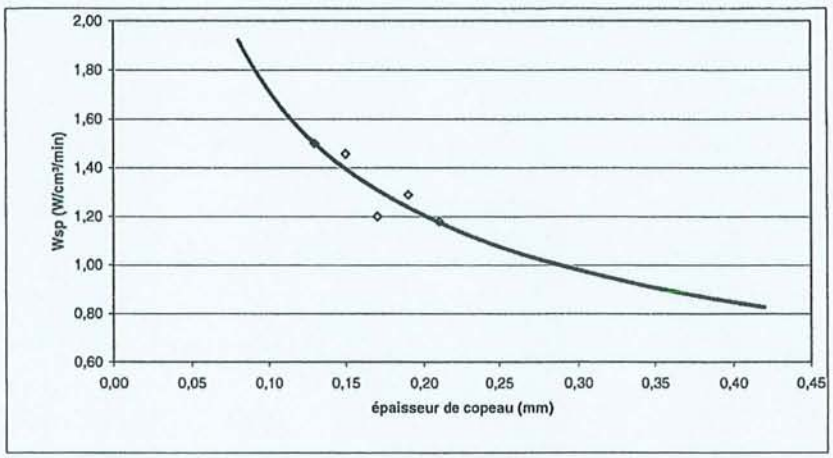


Figure 65 : Evolution du travail spécifique en fonction de la variation de l'épaisseur de copeau par mesure de la puissance.

Donc ici, nous pouvons voir qu'effectivement il y a une altération du comportement du travail spécifique au fur et à mesure que nous faisons diminuer l'épaisseur de copeau. Le point que génère le décrochement de la courbe se trouve à une valeur de 0.17 mm. En - dessous de cette valeur, le travail spécifique va croître de façon plus importante. Ainsi, nous pouvons dire que notre limite inférieure pour ce paramètre ne doit pas être en-dessous de 0.17 mm car, au niveau des efforts de coupe et de la puissance, la tendance exprimée en tant que travail spécifique montre une augmentation très importante.

5.3.3. L'état de surface

Les résultats des mesures pour ce paramètre sont présentés dans la figure 66. Il est très intéressant de voir sur cette figure qu'au fur et à mesure que l'épaisseur de copeau diminue, la qualité de la surface engendré est améliorée. En même temps, l'avance par dent se réduit évidement en magnitude, ainsi les traces que laisse le couteau entre une coupe et la suivante sont de plus en plus étroites. Donc la qualité de la surface est régulièrement améliorée. Nous avons trouvé que l'état de surface atteint un point où la qualité ne peut pas être surpassé : ce point est équivalent avec les mesures de puissance de coupe, et correspond à une épaisseur de copeau de 0.17 mm. En-dessous de ce point, l'état de surface se dégrade mais avec une tendance vers des valeurs a peu près constantes. Les écarts - type pour ce paramètre atteint des erreurs d'entre 8 à 10 %.

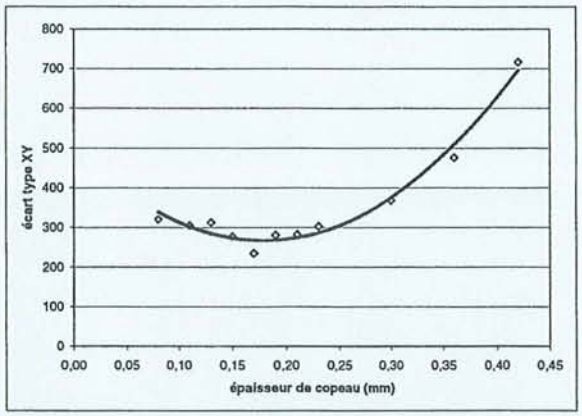


Figure 66 : L'évolution de l'état de surface
par rapport au changement de l'épaisseur de copeau.

En ce qui concerne l'épaisseur de copeau maximum nous le fixons à la valeur limite due au couple vitesse de coupe / vitesse d'avance, c'est à dire à 0.42 mm. D'ailleurs, si nous regardons dans le graphique que montre les résultats dues aux efforts de coupe (Figure 64, page 84) le travail spécifique tend vers une stabilisation, et dans la figure 65 (ci-dessus) l'état de surface se dégrade de plus en plus. D'autre part, le fait que l'état de surface soit dégradé aux valeurs maximales, nous donne un bon indice : nous sommes tout près de la valeur maximale pour l'épaisseur de copeau.

Nous pouvons ainsi conclure que les mesures des efforts de coupe ne sont pas suffisantes pour trouver le point d'épaisseur de copeau minimum. Les résultats montrent qu'une diminution de ce paramètre génère une augmentation du travail spécifique, fait en corrélation avec la théorie. Cependant, l'analyse des données nous montre une possible zone où se trouve notre valeur cible.

Pour compléter l'analyse, il faut toujours faire les mesures des puissances de coupe et de façon indispensable, l'analyse de l'état de surface. Sur le premier point, la puissance de coupe nous permet de fixer l'épaisseur de copeau minimum car il se produit à partir de la valeur déterminée une forte augmentation des puissances.

Donc, en faisant l'analyse des trois paramètres, nous concluons que l'épaisseur de copeau minimale doit atteindre une valeur de 0.17 mm, et qu'en - dessous de cette valeur, le travail spécifique augmente d'une façon plus importante, les puissances de coupe croissent d'une manière plus forte et l'état de surface montre une dégradation.

5.4. Les données limites

Ce point est divisé en deux parties :

- la première concerne la détermination de la section maximale de coupe « A_{Dmax} »
- la seconde pour l'obtention du débit maximum de coupe « Q_{max} »

5.4.1. Section maximale de coupe « A_{Dmax} »

L'objectif est de trouver quelles sont les limites imposées à l'outil pour les engagements radial et tangentiel, c'est à dire quelle est la profondeur maximale et minimale de passe « ap » et la largeur maximale et minimale de coupe « ae ». Ainsi nous pouvons délimiter ces deux paramètres et donc rechercher la zone optimale de travail de l'outil.

Nous prenons comme conditions de départ les paramètres d'usinage suivants :

- la vitesse de coupe minimale = 6.46 m/sec
- l'épaisseur de copeau minimale = 0.17 mm
- la profondeur de passe = 2.0 mm (ap)
- la largeur de coupe = 5.0 mm (ae)

Nous avons modifié l'engagement axial du départ, réglé à 10.0 mm, parce que la zone de coupe présentait une variabilité très importante au niveau densité. Ainsi, nous avons réduit cette plage de densité qui nous a permis d'avoir moins écarts pour l'état de surface. Donc, pour cette série d'essais, nous allons faire varier seulement l'engagement radial (profondeur de passe « ap »).

D'après les caractéristiques géométriques de l'outil nous obtenons que ap_{max} = 14.0 mm ; et ae_{max} = 30.0 mm, ainsi théoriquement A_{Dmax} = 420 mm².

ae = 5.0 mm étant fixé par le matériau, le problème reste à rechercher la valeur réelle pour ap_{max}.

- Les efforts de coupe

Nous avons fait varier ap de 2.0 à 7.0 mm. Nous arrivons, ainsi, à usiner avec une profondeur de passe équivalente au rayon de l'outil. Sur chaque point, nous réalisons 4 essais et pour chaque essai, il y a 6 mesures d'effort de coupe. Ensuite, nous calculons à partir de ces donnés le travail spécifique. Les résultats sont dans la figure 67.

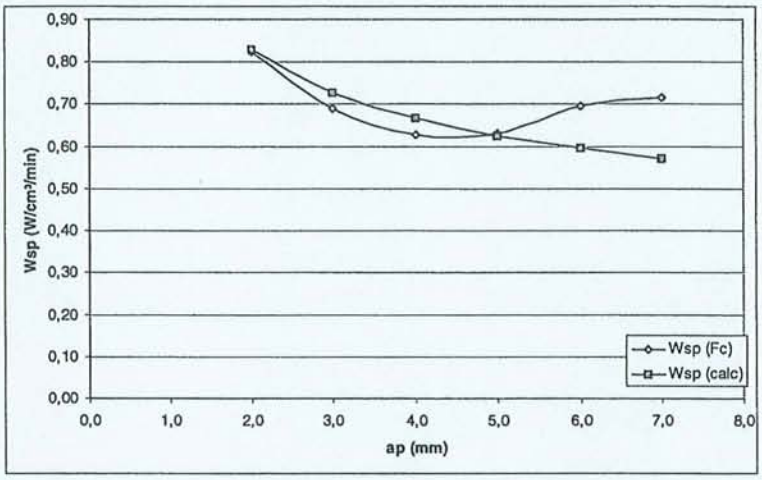


Figure 67 : Evolution du travail spécifique en fonction de l'engagement radial « ap » par mesure d'efforts de coupe.

Dans cette figure, nous pouvons distinguer la courbe théorique nous montrant la tendance du travail spécifique lorsque nous faisons augmenter l'engagement radial. Ensuite, nous avons superposé la courbe résultant de la mesure des efforts de coupe. Nous distinguons deux zones sur cette courbe, la première correspond à un engagement d'entre 2.0 jusqu'à 5.0 mm et montre un emplacement assez proche du niveau théorique. La seconde zone, à partir de 5.0 mm pour « ap » nous montre une nette tendance d'augmentation des efforts de coupe au-dessus du niveau théorique. Ainsi, au-delà de 5.0 mm de « ap », l'outil va trouver des difficultés dans l'usinage exprimées comme une quantité d'énergie plus importante pour enlever ce volume de matière.

- La puissance de coupe

Les résultats pour les mesures de la puissance de coupe sont dans la figure 68. Cette courbe nous permet d'affirmer l'analyse faite avec les efforts de coupe. Nous pouvons voir, qu'entre 2.0 et 5.0 mm pour « ap », une diminution du travail spécifique se produit, c'est à dire il y existe une augmentation des efforts de coupe et plus particulièrement de la puissance de coupe due à l'augmentation de l'engagement radial. Cela génère, par conséquence, une augmentation de l'épaisseur de copeau. Nous arrivons donc à un point où se produit la limite de cette diminution du travail spécifique due à l'augmentation de « ap ». Une augmentation plus importante des efforts de coupe donnera à l'outil des problèmes pour évacuer le copeau. Cela peut s'expliquer par sa faible capacité géométrique, mais surtout par l'importance de l'effort radial quand l'engagement radial est supérieur à 5 mm.

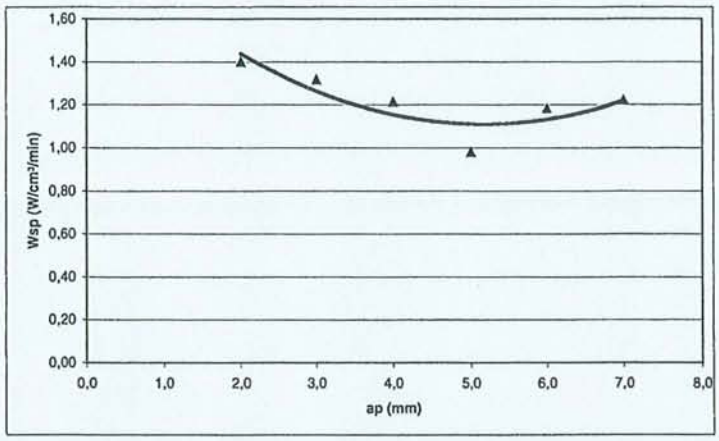


Figure 68 : Evolution du travail spécifique en fonction de l'engagement radial « ap » par mesure de la puissance.

- <u>L'état de surface</u>

L'analyse de l'état de surface nous montre des résultats en d'accord avec les mesures d'efforts de coupe et de puissance. Nous pouvons voir sur la figure 69 le comportement de ce paramètre.

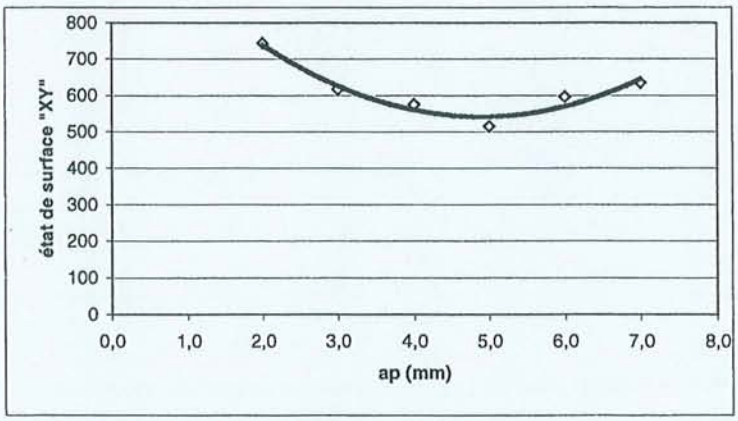


Figure 69 : Evolution de l'état de surface en fonction de l'engagement radial « ap ».

Dans ce graphique, il faut remarquer que les conditions de coupe sont restées constantes et que le seul paramètre que nous avons fait varier est l'engagement radial « ap ». L'avance par dent reste en conséquence constante pour tous les points. Ainsi, l'un des paramètres qui a une influence très importante sur l'état de surface est contrôlé.

Il existe donc, un niveau optimum pour ap où l'épaisseur de copeau et l'effort de coupe donnent une surface de meilleure qualité (5.0 mm pour notre cas).

En conclusion, les trois paramètres étudiés : l'effort de coupe, la puissance et l'état de surface, nous ont permis de trouver la section maximale de coupe pour notre outil travaillant sur du MDF. Nous avons constaté que dans la mesure où l'engagement radial « ap » augmente, l'outil demande une énergie de coupe plus importante, et les efforts de coupe augmentent en produisant les problèmes suivants :

- si la section de coupe augmente, l'épaisseur, ainsi que les efforts de coupe, augmentent également. Le mouvement d'avance contraint l'outil à se déplacer. Mais l'effort radial ; perpendiculaire à l'avance, gêne le mouvement de rotation de l'outil.
- avec la rotation effective de l'outil, nous avons une grande partie de l'effort radial avec une résultante négative et ainsi, l'effort de coupe aura une tendance à plonger dans la matière.
- la conséquence de cette tendance négative a des effets directs sur l'état de surface, puisque si l'effort qui se produit au moment du départ de la coupe est négatif il peut produire de micro - fissurations dans la nouvelle surface de coupe.

D'après nos analyses ces problèmes sont critiques à partir de 5.0 mm de « ap », donc l'augmentation des efforts de coupe, du travail spécifique et la dégradation de l'état de surface.

Le second problème qui se produit lorsque nous faisons augmenter beaucoup la section de coupe est associé à la capacité de l'outil pour expulser le copeau. Les conséquences de la surcharge de copeau sur l'outil sont une augmentation des frottements sur la face d'attaque, l'augmentation de l'effort de coupe (particulièrement l'effort radial), une usure prématurée de l'arête.

La figure 70 montre les limites de la section de coupe, nous pouvons travailler dans la zone en pointillé. Les problèmes que nous pouvons rencontrer au-delà de ces limites, pour ce type d'outil travaillant sur du MDF, sont des efforts de coupe très importants et des états de surface de mauvaise qualité.

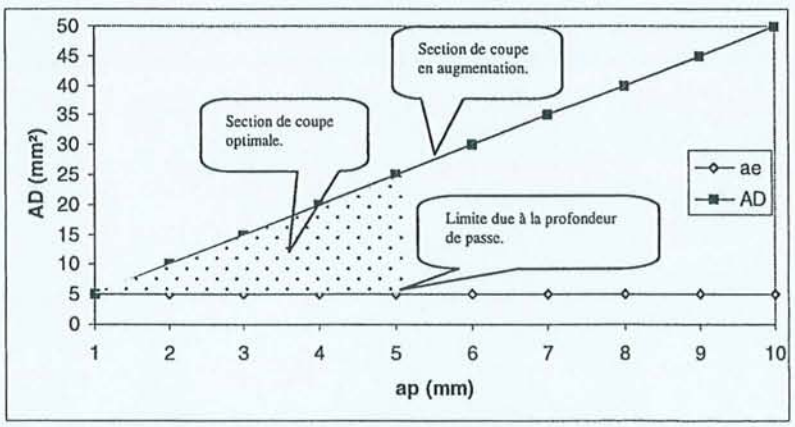


Figure 70 : La section de coupe optimale.

5.4.2. Le débit maximum de coupe « Q_{max} »

L'objectif de la détermination du débit maximum est de connaître quelle est la capacité de l'outil pour enlever un volume déterminé de copeau en une minute.

La norme précise deux façons d'obtenir le débit maximum :

- faire augmenter régulièrement l'épaisseur de copeau jusqu'à l'épaisseur maximale
- si l'épaisseur maximale de copeau est atteinte, faire augmenter régulièrement la vitesse de coupe sous épaisseur de copeau maximale.

Dans un premier temps, considérons la variation d'épaisseur du copeau. Les conditions d'usinage suivantes pour la réalisation de nos essais :

La profondeur de passe obtenue pour A_{Dmax} ,ap = 5.0 mm
La largeur de coupe obtenue pour A_{Dmax} ,ae = 5.0 mm
La vitesse de coupe utilisée pour A_{Dmax} ,Vc = 6.46 m/sec

Avec des paramètres d'usinage constants, l'épaisseur de copeau est progressivement augmentée par l'intermédiaire de la vitesse d'avance.

Ainsi, la relation qui permet d'obtenir Q est la suivante :

$$Q = A_D * Vf$$

Où Q = le débit (cm^3/min)
A_D = la section de coupe (mm^2)
Vf = la vitesse d'avance (m/min)

- Les efforts de coupe

L'analyse des efforts de coupe permet de donner une idée de la position de la valeur du débit maximale. Cependant, si nous regardons le graphique dans la figure 71, il n'est pas tout à fait évident de trouver ce point.

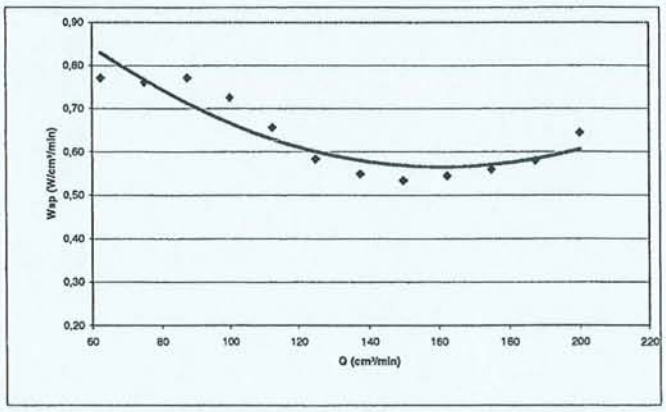


Figure 71 : Travail spécifique en fonction du débit de coupe mesuré à partir des efforts de coupe.

Nous pouvons penser qu'il se trouve à une valeur de 150 cm³/min parce que c'est le point où le travail spécifique montre son niveau le plus bas et qu'ensuite il se produit le décrochement de la courbe vers des valeurs plus importantes. C'est à dire qu'en travaillant avec une section de coupe donnée (constante), l'outil peut usiner sans problème jusqu'à une vitesse d'avance de 6,0 m/min et une épaisseur de copeau de 0,40 mm. L'augmentation des efforts de coupe sera beaucoup trop importante face au changement de ces deux paramètres.

- La puissance de coupe

De même que pour les efforts de coupe, la puissance ne montre pas d'une façon très évidente le point où se trouve le débit maximum. Dans la figure 72, nous pouvons voir l'évolution de la puissance de coupe, exprimée par le travail spécifique. Elle diminue progressivement pour arriver à sa valeur minimale lorsque le débit atteint 150 cm³/min, pour ensuite commencer à monter doucement.

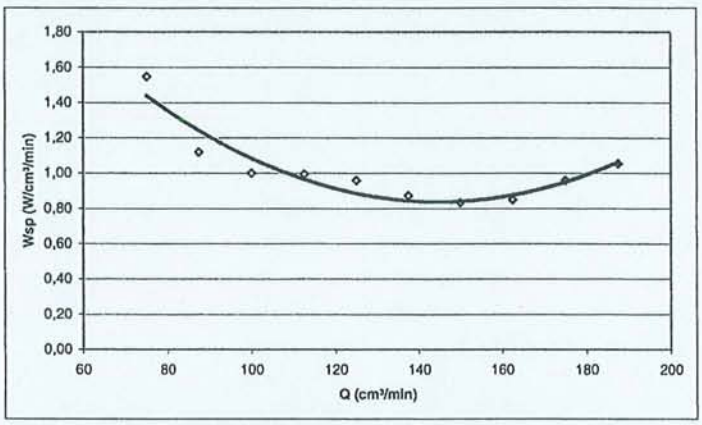


Figure 72 : Travail spécifique calculé à partir de la puissance de coupe.

Le point trouvé ici est équivalent avec l'analyse des efforts de coupe. La puissance de coupe, en constante augmentation dès le premier point et engendre une diminution du travail spécifique (rapport inverse des courbes). Cependant, nous arrivons au point où l'énergie produite est plus importante à cause de la vitesse d'avance et il se produit le décrochement de la courbe lorsque nous passons ce seuil limite.

- L'état de surface

L'état de surface (figure 73), nous permet de visualiser très clairement le point limite pour le débit maximum. Nous observons un changement de faible amplitude pour les écarts type dans les premiers essais. L'épaisseur de copeau augmente progressivement au fur et à mesure que le débit de coupe augmente. Nous observons la croissance de la courbe, avec un point limite lorsque l'état de surface commence à se dégrader fortement, pour une valeur de 150 cm³/min. Au-delà de ce point, la dégradation de la surface évolue très fortement, comme nous pouvons l'observer sur le graphique.

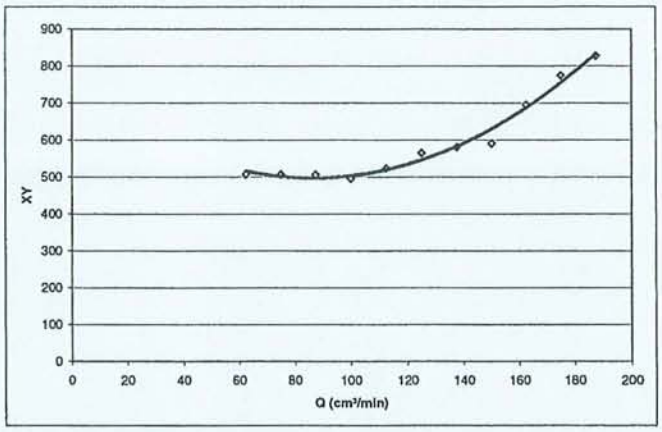


Figure 73 : L'évolution de l'état de surface lorsque le débit de coupe augmente.

Cette augmentation de l'épaisseur de copeau a eu pour résultats que :

- les efforts de coupe et la puissance de coupe montrent des valeurs de plus en plus fortes, cependant le comportement trouvé pour le travail spécifique, déterminé à partir de ces deux paramètres, nous permet de voir que les courbes résultats ont une autre tendance.
- la tendance normale de ces courbes doit être d'une décroissance continue, mais nous arrivons au point où le travail spécifique commence à augmenter lorsque la puissance et l'effort poursuivent à augmenter.
- nous trouvons le point limite où se produit le décrochement des courbes et qu'est équivalent à l'épaisseur maximale de copeau. C'est à dire, que notre outil (en travaillant le MDF avec les conditions de coupe données en la page 91) n'est pas capable d'usiner avec la section de coupe déterminé et une vitesse de coupe supérieure à celle que donne un épaisseur de copeau qu'est équivalent à l'épaisseur maximale de copeau.

Au-delà de ces conditions, et en plus des efforts de coupe très fortes que contraint l'outil à avancer et tourner, nous avons trouvé une forte dégradation de l'état de surface qu'est surtout marqué à partir du point où se trouve le débit maximale et qu'est par conséquence la limite due à l'épaisseur maximale de copeau.

Il faut ajouter que comme la section de coupe est trop grande pour la vitesse d'avance donnée, le volume de copeau produit trouve des problèmes pour être expulsé, il se comprime, réchauffe l'outil due aux frictions et en conséquence l'effort résultant est plus fort et en plus l'usure est accentué.

5.5. Essais d'usure (2)

Les problèmes de détermination de l'usure de l'arête de coupe résident dans la difficulté de quantification de celle-ci. L'industrie mécanique utilise le modèle de Taylor mais la détermination de certaines constantes est très difficile pour le matériau bois. Des identifications pratiques sont utilisées (projecteur de profil, profilomètre, laser...). Mais la valeur de l'usure est difficilement quantifiable par ces méthodes, car celles-ci demandent un positionnement parfait de l'outil.

L'imprécision pour mesurer l'usure de l'arête de coupe nous a orienté vers le développement d'une méthode, tenant compte de l'effort de coupe, et plus particulièrement de sa direction par rapport à la face de coupe de l'outil.

Cette méthode, nous permet de connaître la variation angulaire de l'effort de coupe et de définir correctement les facteurs "longueur usinée" et "temps d'usinage". Une variation importante de cet angle nous permet de fixer une limite d'usinage, suivant le couple outil - matière étudiée. Cette recherche donnera dans le futur la connaissance réelle de l'usure d'un outil en fonction du matériau utilisé.

5.5.1. Etat de l'art

La quantification de l'usure de l'arête de coupe a une grande importance dans l'usinage du bois. En effet, l'usure progressive entraîne une augmentation de la consommation de puissance machine et de la détérioration de la surface de la pièce. Nous pouvons donc définir l'usure comme la perte de matériau de l'arête de coupe due aux facteurs mécaniques et/ou chimiques associées au processus de coupe. Les facteurs dépendant de l'outil, des conditions de coupe et du matériau sont intimement liées.

Un aspect très important est le rapport entre l'usure et les efforts de coupe. Ainsi, il est possible de détecter l'usure des outils en comparant la direction des efforts de coupe mesurée avec un outil neuf, et celle obtenue avec l'outil en cours d'usinage [ANS96].

Dans le cas du perçage, la détermination d'efforts peut être réalisée avec une surveillance automatique de l'usinage, servant à détecter la limite d'usure d'outils. La surveillance peut être effectuée hors ou pendant l'usinage. Ainsi on peut faire un contrôle soit directement par moyen d'un capteur faisant la mesure d'usure de l'outil, soit indirectement en déduisant l'usure par la variation d'un facteur extérieur à l'outil comme la mesure des efforts d'usinage [FUR96]. Cet auteur a trouvé pour l'effort axial, une augmentation progressive de l'effort à mesurer augmentant avec le nombre de perçages. Cette augmentation de l'effort est due à l'usure en dépouille de la pointe de l'outil. Celle-ci entraîne une augmentation de l'effort de pénétration.

Le processus d'usure de l'arête de coupe par rapport à la longueur de bois usinée montre trois zones caractéristiques : le recul de l'arête est important au début (zone 1 de rodage), une zone de stabilité (zone 2 linéaire) caractérisant le travail normal de l'outil, et une zone 3 qui apparaît lorsque l'outil a atteint une usure importante faisant augmenter sensiblement le recul de l'arête. Normalement l'outil en travaillant dans la zone 2 (« linéaire ») va présenter une certaine variation de l'angle due à des

(2) [AGU99b]

changements de l'effort de coupe (variabilité expérimentale). La valeur moyenne de l'effort normal s'annule et l'effort tangentiel reste à peu près constant. D'après [FRA58], il y a une diminution de l'effort normal qui tend vers zéro lorsque l'angle de coupe s'approche de 25°. Dans la direction de coupe B, un angle de coupe de 10° apparaît comme une valeur minimale et que sa diminution peut entraîner une augmentation de l'énergie de coupe. En plus, à 10° se trouve le point de changement de signe : c'est-à-dire que la valeur pour l'effort de déformation du copeau est égale à zéro.

Dans les facteurs dépendants de l'outil, il faut noter le rapport entre la géométrie de l'arête et l'effort. Dans le cas de l'angle de coupe, les lois d'usinage montrent que l'effort imposé à une dent décroît d'une façon continue quand cet angle augmente. Pour l'angle de dépouille, l'effort ne varie pas d'une façon significative [CHA68]. Pour la vitesse de coupe, l'effort est invariable quand la vitesse varie entre 5 et 50 m/s : la vitesse de coupe n'a pas d'influence significative sur l'effort [KIV50].

Les changements de la géométrie du profil due à l'usure sont plus corrélés à la performance de l'outil qu'à la quantité d'usure [SHE97]. Ainsi la qualité de surface et la composante normale de l'effort sont très sensibles aux changements de la géométrie du profil.

5.5.2. Méthodologie

L'application de la méthodologie COM nous a permis de définir les conditions optimales d'usinage pour un outil spécifique en travaillant sur une matière bien connue, pour que la durée de vie de l'outil soit maximale pour un état de surface de la pièce correct. Le positionnement de l'outil par rapport à la matière est montré dans la figure 74.

Les principaux critères pour observer l'usure sont :

- l'augmentation de la puissance de coupe
- l'augmentation des efforts de coupe
- la détermination de l'état de surface

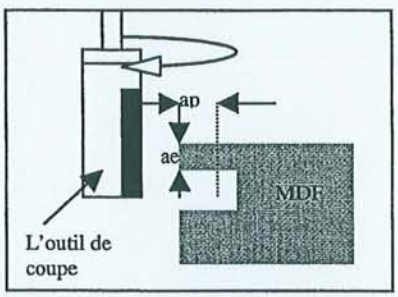
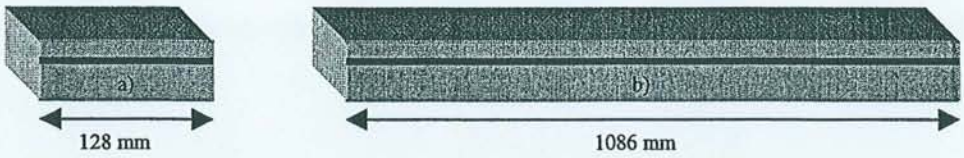


Figure 74 : positionnement de l'outil par rapport à la matière.

Nous avons choisi les conditions de coupe suivantes d'après les données issues des nos déterminations de la zone optimale de coupe en utilisant la méthodologie Couple Outil Matière:

- vitesse de coupe : 6.46 m/s (vitesse de rotation équivalent à 9000 tr/min)
- profondeur de passe : 2.0 mm (max. 14 mm)
- largeur de coupe : 5.0 mm (max. 30 mm)
- épaisseur du copeau : 0.17 ; 0.38 mm
- Section de coupe inférieure à A_{Dmax} = 10 mm²
- Débit de copeau inférieur à Q_{max} = 40 cm³/min

Après la réalisation de ces essais nous augmentons l'épaisseur de copeau à sa valeur maximale de 0.38 mm ; la vitesse d'avance passe de 4.0 à 9.0 m/min, le débit de coupe augmente à 90 cm³/min et tous les autres paramètres de coupe restent constants. Ainsi les essais d'usure ont été réalisés sur deux types d'éprouvettes :



Et la séquence d'essais a été :

- mesure des efforts de coupe sur l'éprouvette a) répété 4 fois
- mesure de la puissance de coupe sur l'éprouvette b) répété 4 fois
- mesure de l'état de surface sur l'éprouvette a) répété 4 fois

Ces mesures sont faites au départ, à 100 m et ensuite tous les 200 m de bois usiné, jusqu'à la limite due à une altération des paramètres mesurés.

5.5.3. Résultats

En utilisant nos moyens d'analyse comme les efforts de coupe, la puissance et l'état de surface, nous avons cherché à connaître l'influence de l'usure de l'arête de coupe sur ces paramètres, et à déterminer d'une manière plus simple ses limites.

Le critère principal de l'analyse approfondie de l'usure est l'effort de coupe. Il est bien connu qu'il existe une corrélation positive entre le recul de l'arête et l'augmentation des efforts [FUR96] et [KIV50].

Nous calculons l'angle «$\widehat{F_cF_y}$» entre l'effort de coupe et sa composante tangentielle Fy (figure 75). Cet angle peut varier d'une valeur positive à une valeur négative d'après les changements de l'effort axial (Fx). Nous prenons les valeurs moyennes pour les deux composantes Fx et Fy, et nous calculons la tangente de l'angle. Les résultats sont présentés dans la figure 76.

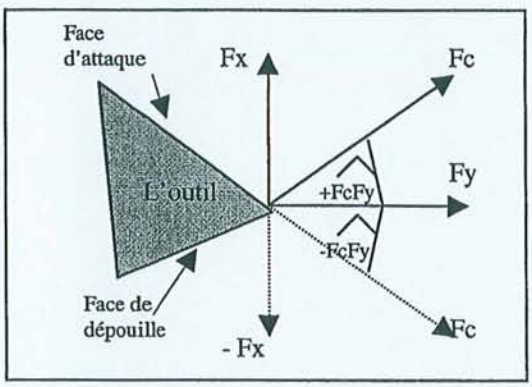


Figure 75 : L'angle «$\widehat{F_cF_y}$» pour mesurer l'usure.

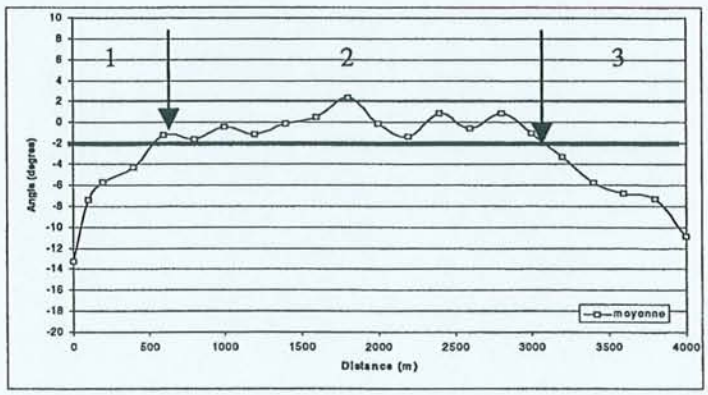


Figure 76 : Comportement de l'angle «$\widehat{F_cF_y}$» en fonction de la distance de bois usinée.

Nous pouvons distinguer clairement, figure 76, trois zones qui montrent l'évolution de l'usure :

- zone 1 : « rodage » de l'outil, de 0 à 500 m
- zone 2 : « linéaire » ou de stabilité, entre 500 et 3000 m
- zone 3 : « chute » ou fort recul de l'arête, dès 3000 m.

Dans la zone 1, nous trouvons une évolution de l'angle de –13 degrés à son origine (usure = 0) jusqu'à une valeur voisine à –2 degrés, que correspond à 500 m de bois usiné. La tendance, dans cette zone, est de trouver rapidement un point d'équilibre vers un angle compris entre ± 2 degrés. Il est très intéressant d'observer qu'au départ, se produit un refus net à la coupe, due vraisemblablement à une mauvaise géométrie de la pointe de l'arête de coupe. Progressivement l'usure tend à se stabiliser par effet de l'usinage entraînant une diminution en même temps de l'effort normal et de l'angle « $\widehat{F_cF_y}$ ».

Ainsi, au fur et à mesure que la distance usinée augmente, la valeur moyenne pour l'effort tangentiel reste à peu près constante tandis que l'effort normal diminue progressivement. Ainsi, cette première zone que nous appelons de « rodage » permet de faire reculer l'arête de coupe jusqu'à un niveau d'équilibre qui se trouve à 500 m de bois usinés, où l'effort normal diminue pour être stable à partir de cette distance.

Dans la zone 2 nous observons clairement qu'il existe un comportement stable de l'angle, avec une tendance à se positionner vers 0° et en fluctuant dans la zone ± 2°. L'étendue de cette zone va de 500 m jusqu'à 3000 m de bois usinés.

La zone 3 nous montre la chute de la courbe dès la distance de 3000 m. En effet l'effort tangentiel et l'effort normal commencent à augmenter. Mais ce qui est plus important est l'augmentation de l'effort normal entraînant la chute de l'angle «$\widehat{F_cF_y}$». L'influence de l'usure de l'arête de coupe est nettement marquée par l'augmentation de cet effort contraignant l'outil en rotation (figure 77).

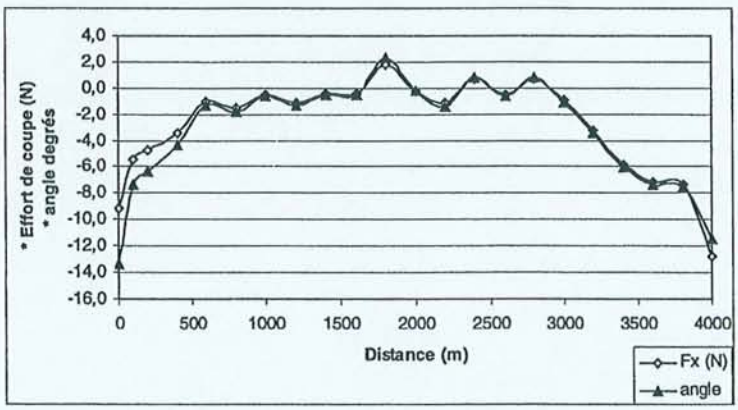


Figure 77 : Rapport entre l'effort normal (Fx) et l'angle «$\widehat{F_cF_y}$».

Ainsi nous pouvons fixer la durée de vie acceptable de l'outil en travaillant sur du MDF, pour des conditions de coupe situées dans la zone de fonctionnement optimal, et pour une distance usinée de 3000 m. Cela correspond à 7'53" min de temps réel d'usinage. En plus il faut indiquer que l'outil ne présenterait pas d'usure significative

lorsque l'angle «F_cF_y» est compris entre ± 2°. Si cet angle diminue au-delà de ces limites, nous avons déjà atteint la durée de vie limite de l'outil. Le comportement de l'effort de coupe total (Fc) est montré dans la figure 78, et les efforts tangentiels (Fy) et normal (Fx) sont dans la figure 79.

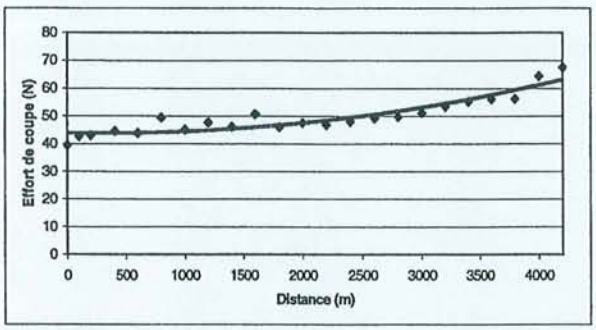


Figure 78 : Evolution de l'effort de coupe par rapport à la distance de bois usinée.

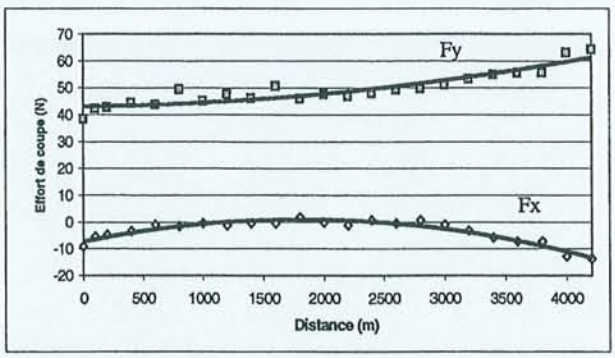


Figure 79: Evolution des efforts tangentiels (Fy) et normal (Fx) par rapport à la distance de bois usinée (épaisseur de copeau = 0.17 mm).

- Les effets dus à la puissance de coupe sur l'usure.

L'évolution de la puissance de coupe comme nous le pouvons voir sur la figure 80 est équivalente à celle des efforts de coupe. Donc, au fur et à mesure que l'usure de l'outil se manifeste, nous trouvons une montée de la puissance de coupe qui est effectivement plus accentuée à partir de 3000 m de bois usinés.

- L'état de surface.

Nous pouvons observer dans la figure 81 les résultats des mesures de l'état de surface. Dans cette figure, nous constatons une tendance vers une dégradation de l'état de surface lorsque la distance de bois usinée augmente. En général, nous observons un comportement de l'effet de l'usure peu significatif sur l'état de surface. En effet, le facteur le plus important sur la qualité de la surface est l'épaisseur de copeau. Dans nos essais ce facteur est resté constant.

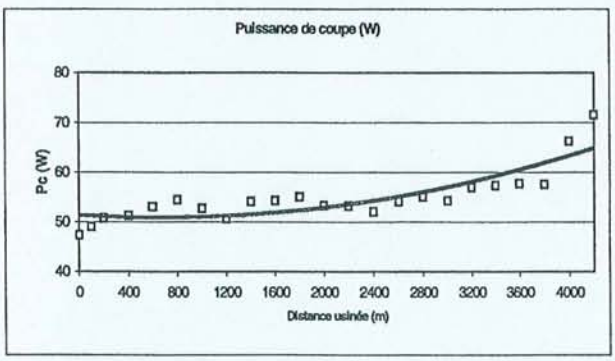


Figure 80 : L'influence de l'usure sur la puissance de coupe.

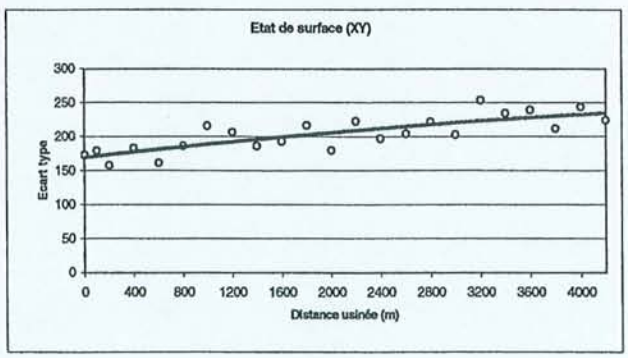


Figure 81 : Comportement de l'état de surface par rapport à l'usure de l'outil.

- Comportement de l'angle « α » sous épaisseur de copeau maximale.

Nous avons voulu savoir quel est le comportement de l'angle «$\widehat{F_cF_y}$» si nous travaillons sous des conditions de coupe différentes avec une épaisseur de copeau maximale. Nous avons trouvé un comportement similaire à l'essai précédent. Les conditions de coupe (choisis dans notre zone de validité résiduelle, voir pag.95) ont été modifiées pour atteindre l'épaisseur de copeau maximale. La vitesse d'avance, de 4.0 m/min pour un épaisseur de copeau minimale de 0.17 mm, a été changé à 9.0 m/min pour une épaisseur de copeau maximale de 0.38 mm. Les résultats sont montrés dans les figures 82 et 83.

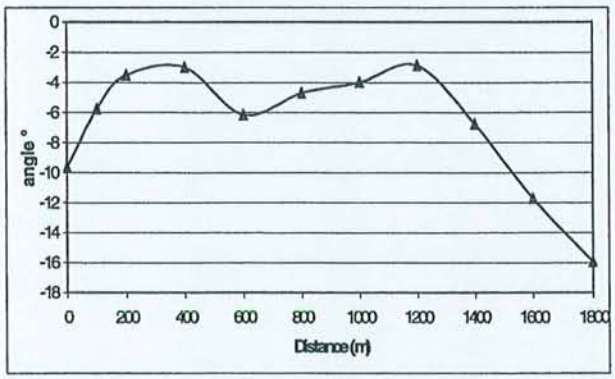


Figure 82 : Angle «$\widehat{F_cF_y}$» sous ec max (ecmax = 0.38 mm).

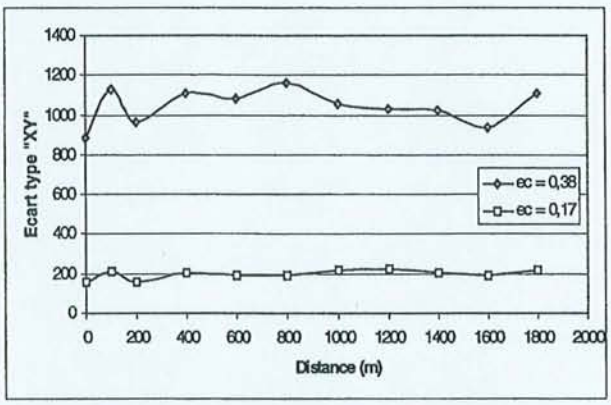


Figure 83 : Les états de surface par rapport à l'usure de l'outil et à l'épaisseur de copeau.

Nous trouvons sur la figure 82 un comportement similaire à l'essai réalisé avec l'épaisseur de copeau minimale. Nous avons les trois zones qui nous permettent de définir les états d'usure de l'outil. Cependant, avec le changement des conditions d'usinage, nous observons que l'angle tend à se stabiliser à environ –5° (entre 0 et –2° pour ec min). L'influence de l'épaisseur de copeau est importante soit sur l'angle soit sur l'effort normal Fx. Ainsi, si l'épaisseur de copeau est de plus en plus grand, la valeur moyenne de l'effort normal aura une tendance à être plus négative. Lorsque sa valeur chute au-delà de sa valeur de stabilisation c'est que l'outil a atteint sa durée de vie limite.

La limite obtenue situe à environ 1200 m de MDF usiné, ce qui correspond à peu près à 3.19 min de temps effectif d'usinage. Pour les deux essais (épaisseur de copeau « ec » min et « ec » max) nous avons travaillé avec des éprouvettes de même longueur. Dans le cas de « ec » min, nous avons fait 289 coupes sur l'éprouvette d'un mètre de longueur, jusqu'à trouver la chute de la courbe ; 236 coupes pour « ec » max. C'est à dire qu'en travaillant avec une épaisseur de copeau plus grand, la longueur de bois usiné est plus réduite pour trouver la limite de durée de vie de l'outil. Par contre, la quantité de pièces usinées est très proche de celle avec une épaisseur de copeau plus petite. Le critère qui nous permettra de choisir entre une valeur ou une autre est l'état de surface. Le résultat est dans la figure 83.

Dans celle-ci, les deux courbes suivent une tendance à peu près constante. L'influence de l'usure sur l'état de surface est significative si l'outil présente une dégradation très importante de l'arête de coupe, et avec une avance par dent importante.

Donc il est possible de choisir un état de surface d'après l'objectif en tenant compte de quelques points :

- Un état de surface de bonne qualité permet d'usiner une quantité « n » de pièces et l'usure de l'arête de coupe se trouvera à une distance « d » et un temps « t ». Un état de surface de mauvaise qualité permettra d'usiner une quantité légèrement inférieure à « n » mais l'usure se trouvera à environ « d/2 » et «t/2 ». Un état de surface intermédiaire fera diminuer progressivement « n » et « d ».
- Le temps effectif d'usinage « t » pour l'outil est maximal (sans usure significative) si l'épaisseur de copeau est minimale (dans notre zone de validité résiduelle)
- A un temps d'usinage égal à « t/2 » avec une épaisseur de copeau importante, la quantité de pièces usinées est similaire et la productivité est augmentée mais avec une détérioration de la qualité de la surface.

Discussion et conclusions

L'application de la méthode COM nous a apporté les éléments fondamentaux pour fixer tous les paramètres de coupe dans une zone de travail optimale pour un outil de coupe spécifique. Cette zone restreinte par un certain nombre de contraintes dues au matériau, à l'outil ou même au processus, détermine son utilité pour un usinage dans des limites clairement établies.

Les essais réalisés pour la détermination de l'usure de l'arête de coupe nous ont permis de trouver d'une façon relativement simple la durée de vie de l'outil. En analysant les composantes de l'effort de coupe, nous pouvons connaître la variation angulaire qui se produit entre eux. Un changement brusque de la composante normale de l'effort de coupe est déterminante pour l'obtention de la limite de la durée de vie de l'outil.

Nous avons visualisé assez clairement trois zones où le comportement de la variation angulaire présente des caractéristiques bien définies. Une première zone lorsque l'arête est sans usure montre un refus à la coupe du probablement aux dépôts métalliques sur l'arête qui altéreraient sa géométrie. Une seconde zone où le comportement de l'angle est constant avec de légères fluctuations entre ± 2°, avec des efforts de coupe et un état de surface sans une grande variabilité. Le point qui sépare cette zone de la suivante nous permet d'identifier la limite pour la durée de vie maximale de l'outil. La dernière zone montre la chute de l'angle. La composante normale montre des valeurs de plus en plus importantes nous indiquant que l'arête est usée. La puissance de coupe monte régulièrement et l'état de surface se dégrade faiblement.

La tendance de l'effort normal à se positionner autour de zéro peut s'expliquer de la façon suivante : lorsque l'outil touche la matière et commence à enlever le copeau, il se produit un effort positif jusqu'à la position moyenne du copeau. Puis avec le copeau devenant de plus en plus épais, il se produit progressivement la diminution

de cet effort pour atteindre sa valeur la plus négative à épaisseur de copeau maximale. D'après les essais que nous avons faits en faisant augmenter la profondeur de passe, nous nous sommes rendus compte que cette composante atteignait des valeurs négatives plus importantes. A l'inverse, si la profondeur de passe est réduite, l'effort normal tend à trouver seulement des valeurs positives.

En récapitulatif :

1. L'analyse du rapport effort tangentiel / effort normal permet de déterminer la durée de vie de l'outil. Le changement angulaire de ce rapport montre 3 zones de comportement bien défini.
2. L'effort normal est très sensible à l'usure. Cet effort caractérise très bien le comportement de l'angle «$\widehat{F_cF_y}$».
3. La puissance de coupe et l'état de surface ne permettent pas d'expliquer une augmentation de l'usure. Les changements de valeurs de l'effort total donnent des résultats plus précis dans la recherche de l'usure de l'arête de coupe.
4. Le contrôle de l'effort normal pendant la coupe permet de définir la limite de travail d'un outil.
5. Le comportement de l'état de surface est surtout lié à l'épaisseur de copeau, l'influence de l'usure sur ce paramètre est négligeable.
6. Pour nos conditions de coupe, à épaisseur de copeau minimale, la fluctuation de l'angle «$\widehat{F_cF_y}$» n'est pas au delà de ±2°. Si l'épaisseur de copeau est maximale, «$\widehat{F_cF_y}$» se situe entre ±5°.
7. La méthode COM permet de délimiter les conditions de coupe dans une zone où la durée de vie de l'outil est en accord avec le respect d'un travail en sécurité.

5.6. Essai de détermination des paramètres auxiliaires

L'objectif est de déterminer l'énergie spécifique de coupe corrigée en fonction de l'épaisseur de copeau, de façon à pouvoir déterminer les énergies de coupe sous différentes conditions d'usinage.

Le modèle à utiliser est :

$$W_{sp} = W_{sp,ref} \, (e_{c,ref}/e_c)^{mc}$$

Où : W_{sp} = énergie spécifique de coupe (W/cm³/min)
$W_{sp,ref}$ = énergie spécifique de coupe de référence (W/cm³/min)
$e_{c,ref}$ = épaisseur de copeau de référence (mm)
e_c = épaisseur de copeau (mm)
mc = coefficient correcteur de W_{sp}

Les conditions à respecter sont :

- posséder une vitesse de coupe supérieure à $V_{c,min}$
- posséder une épaisseur de copeau dans la plage $e_{min} - e_{max}$.

Nous avons donner comme épaisseur de copeau de référence la valeur minimale (e_{min} = 0.17 mm), donc d'après les formules classiques d'usinage, nous calculons l'énergie spécifique de coupe et si nous appliquons le modèle ci-dessus, nous obtenons :

$$W_{sp} = 0.828 \, (0.17/ec)^{mc}$$

Pour trouver la valeur de mc, nous faisons évoluer ec de sa valeur minimale jusqu'à sa valeur maximale, et nous résolvons de façon logarithmique l'équation, ainsi les résultats sont :

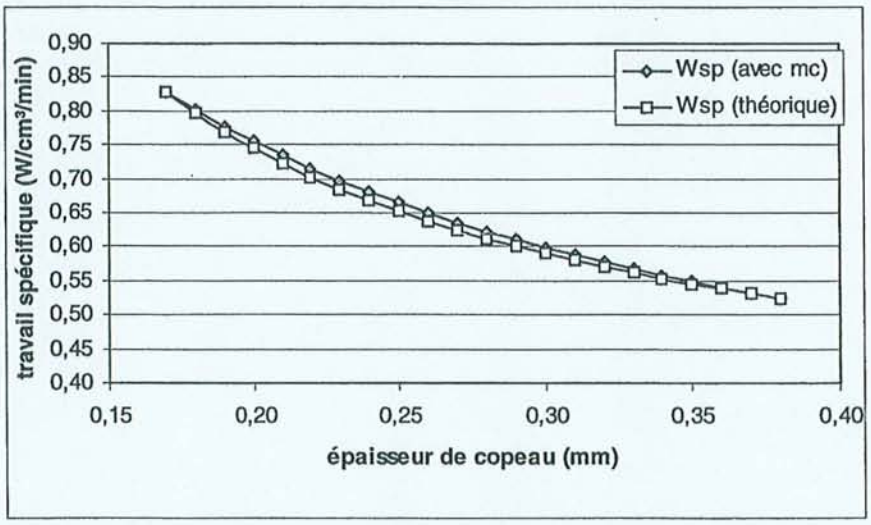


Figure 84 : Rapport entre W_{sp} théorique et W_{sp} déterminé avec mc.

Donc la valeur que nous pouvons calculer d'après les formules classiques de l'usinage pour W_{sp} en considérant une valeur pour mc = 0.571 nous permet de estimer sa valeur théorique de façon très précise.

Ainsi en faisant varier l'épaisseur de copeau nous obtenons le tableau 7:

Tableau 7 : Comparaison entre l'énergie de coupe théorique avec celle déterminé avec le coefficient correcteur « mc »

Wsp,ref	ec,ref	ec	mc	Wsp (avec mc)	Wsp (théorique)
0,828	0,17	0,17	0,571	0,828	0,827
0,828	0,17	0,18	0,571	0,801	0,796
0,828	0,17	0,19	0,571	0,777	0,769
0,828	0,17	0,20	0,571	0,755	0,745
0,828	0,17	0,21	0,571	0,734	0,723
0,828	0,17	0,22	0,571	0,715	0,702
0,828	0,17	0,23	0,571	0,697	0,684
0,828	0,17	0,24	0,571	0,680	0,667
0,828	0,17	0,25	0,571	0,664	0,652
0,828	0,17	0,26	0,571	0,650	0,637
0,828	0,17	0,27	0,571	0,636	0,624
0,828	0,17	0,28	0,571	0,623	0,612
0,828	0,17	0,29	0,571	0,610	0,600
0,828	0,17	0,30	0,571	0,599	0,590
0,828	0,17	0,31	0,571	0,588	0,580
0,828	0,17	0,32	0,571	0,577	0,570
0,828	0,17	0,33	0,571	0,567	0,561
0,828	0,17	0,34	0,571	0,557	0,553
0,828	0,17	0,35	0,571	0,548	0,545
0,828	0,17	0,36	0,571	0,539	0,538
0,828	0,17	0,37	0,571	0,531	0,531
0,828	0,17	0,38	0,571	0,523	0,524

La valeur pour mc est donc égale à 0.571, qui nous permet d'estimer correctement les valeurs théoriques de W_{sp} en fonction de l'épaisseur de copeau, cependant il faut appliquer un facteur de correction à W_{sp} pour calculer sa valeur réelle.

Le facteur de correction va dépendre de :

- l'épaisseur de copeau
- le degré d'usure de l'arête
- la vitesse de coupe

5.7. Résumé des résultats

Nous allons faire un résumé de nos résultats en montrant graphiquement les limites des principaux paramètres de coupe.

- L'épaisseur de copeau : la limite trouvé correspond à 0,17 mm pour sa valeur minimale et 0,42 mm pour sa valeur maximale. La figure suivante montre qu'il existe une limite de la vitesse d'avance associé à ce paramètre. Ainsi une vitesse d'avance trop faible n'est pas acceptable pour atteindre la valeur minimale admise pour l'épaisseur de copeau.

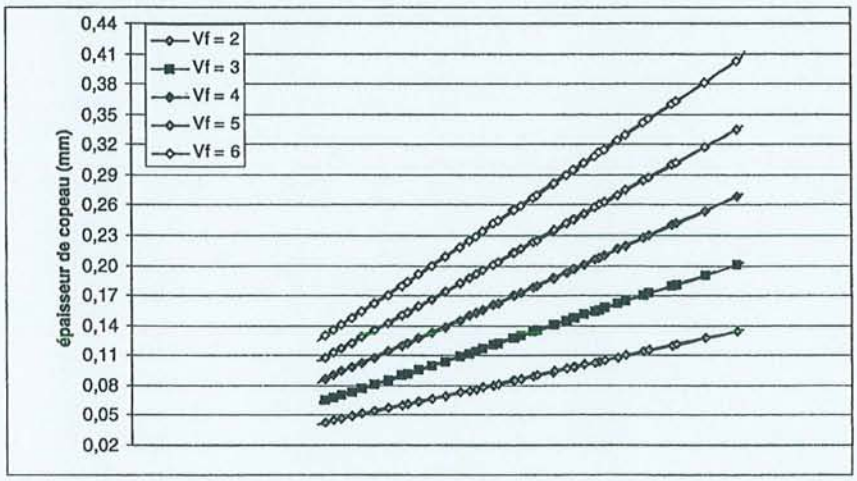


Figure 85 : Limites de l'épaisseur de copeau, associé à la vitesse d'avance.

- Le débit de coupe : les résultats pour ce paramètre sont issus du rapport entre la section de coupe dont nous connaissons ses limites (voir pag.91) de 25 mm², et la vitesse d'avance. La valeur limite trouvée correspond donc à 150 cm³/min et dans le graphique suivant nous observons clairement l'importance de la vitesse d'avance sur les limites maximales pour le débit de coupe. Donc pour une section de coupe constante, le débit augmente si la vitesse d'avance est augmentée. Mais si nous faisons augmenter aussi la section de coupe, nous atteindrons très rapidement les limites acceptables. Ainsi, nous serions obligés de faire diminuer la vitesse d'avance du bois pour être conformes aux limites établies. Les conséquences sont une diminution de la productivité due au travail avec une vitesse d'avance plus faible ou bien son augmentation si la section de coupe est diminuée.

- Le domaine de validité résiduel : en associant toutes les données de nos essais, nous arrivons à déterminer quel est le domaine de validité résiduel pour nos conditions de coupe, c'est à dire les conditions nous permettant de maximiser la durée de vie de l'outil tout en gardant les efforts, les puissances de coupe et une qualité de surface acceptable.

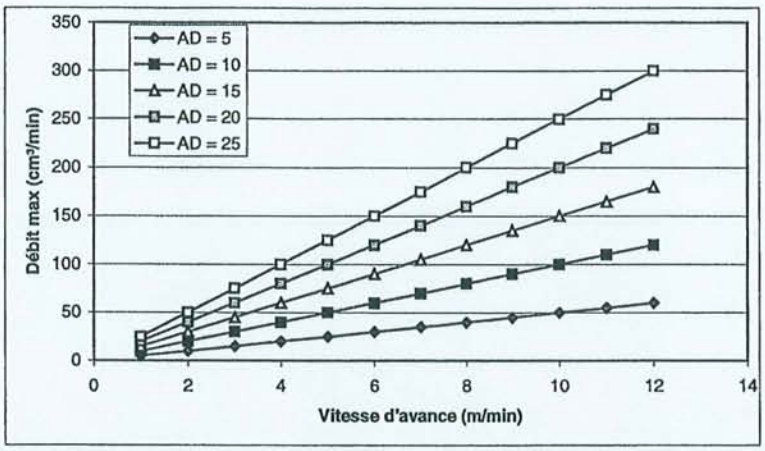


Figure 86 : Comportement du débit de coupe face à la vitesse d'avance.

Notre domaine de validité est caractérisé par trois paramètres, la profondeur de passe « ap » (ou engagement radial), l'avance par dent « fz » et la vitesse de coupe « Vc ». Ces trois paramètres nous permettent d'identifier les limites du domaine. Ainsi si nous considérons le rapport entre la profondeur de passe et l'avance par dent, nous obtenons comme résultat le graphique de la figure 87.

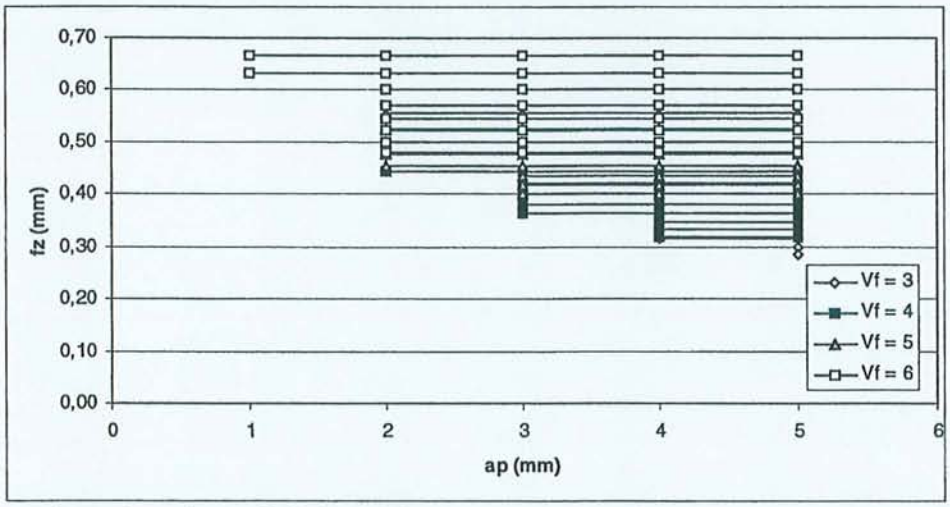


Figure 87 : Le domaine de validité résiduel, rapport profondeur de passe - avance par dent.

Nous constatons que la vitesse d'avance est limitée par rapport à l'épaisseur de copeau minimale, ainsi la vitesse d'avance minimale est de 3,0 m/min. En plus, une augmentation de la profondeur de passe nous donne une zone de travail de plus en plus étendue, respectant les limites soit de la section de coupe soit du débit de coupe ou de l'épaisseur minimale de copeau.

Le paramètre ayant une forte influence sur la limitation du domaine de validité est l'épaisseur de copeau. En fixant ce paramètre pour des conditions optimales de coupe, nous arrivons à délimiter les deux autres paramètres : fz et ap. Il faut savoir que :

$$ec = fz * \sqrt{ap/D} \qquad fz = Vf / (ap/D)$$

où ec = épaisseur moyenne de copeau (mm)
fz = avance par dent (mm)
ap = profondeur de passe (mm)
D = diamètre de coupe (mm)
Vf = vitesse d'avance (m/min)

Ainsi nous connaissons la valeur de ec min = 0,17 mm, la valeur de ap variant jusqu'à 5,0 mm, nous obtenons la valeur correspondante pour fz dans la zone de validité, et nous pouvons savoir en plus la limite admise pour la vitesse d'avance d'après la valeur trouvée pour fz.

Le comportement de l'avance par dent par rapport à la vitesse de coupe est donné dans la figure 88.

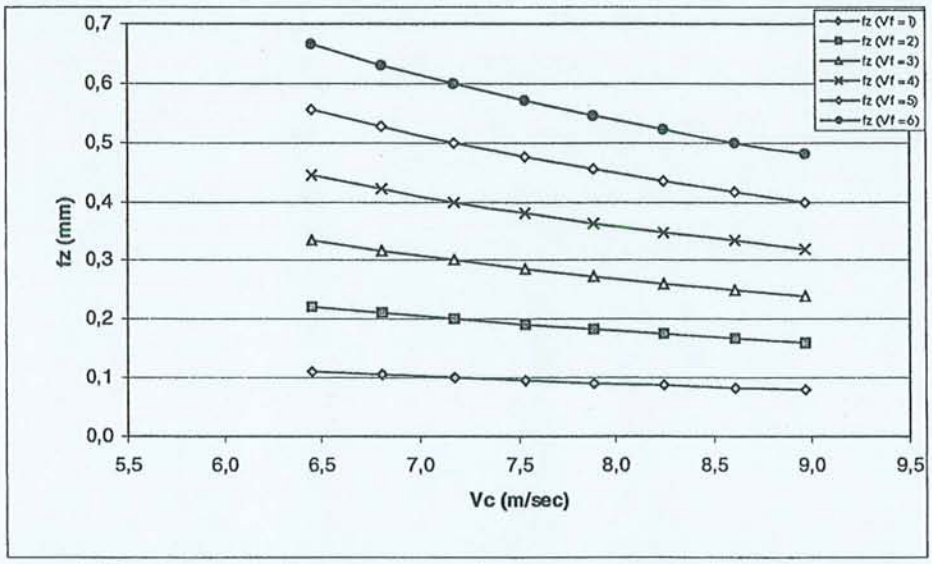


Figure 88 : L'évolution de l'avance par dent par rapport à la vitesse de coupe.

La zone de validité résiduelle va comporter les restrictions suivantes :

- posséder une vitesse de coupe comprise entre 6,5 et 9,0 m/sec (9000 et 12500 tr/min)
- la section de coupe doit être entre 5,0 et 25,0 mm² (ap de 1,0 à 5,0 mm et ae = 5,0 mm)
- le débit de coupe ne doit pas être supérieur à 150 cm³/min
- l'épaisseur de copeau doit être compris entre 0,17 et 0,42 mm
- la vitesse d'avance peut varier entre 3,0 et 12,0 m/min.

Le schéma du tableau 8 suivant montre d'une façon plus détaillée les restrictions mentionnées :

Tableau 8 : Domaine de validité résiduel ; les limites pour les différents paramètres.

La section de coupe est dans ses limites optimales.

Zone d'épaisseur de copeau optimale

Vc	ap	Vf = 1	Vf = 2	Vf = 3	Vf = 4	Vf = 5	Vf = 6	Vf = 7	Vf = 8	Vf = 9	Vf = 10	Vf = 11	Vf = 12
6.50	1	0,030	0,060	0,090	0,120	0,150	0,180	0,210	0,240	0,270	0,300	0,330	0,360
	2	0,042	0,085	0,127	0,170	0,212	0,255	0,297	0,340	0,382	0,425	0,467	0,509
	3	0,052	0,104	0,156	0,208	0,260	0,312	0,364	0,416	0,468	0,520		
	4	0,060	0,120	0,180	0,240	0,300	0,360	0,420					
	5	0,067	0,134	0,201	0,268	0,336	0,403						
6.81	1	0,028	0,057	0,085	0,114	0,142	0,171	0,199	0,228	0,256	0,284	0,313	0,341
	2	0,040	0,080	0,121	0,161	0,201	0,241	0,282	0,322	0,362	0,402	0,442	0,483
	3	0,049	0,099	0,148	0,197	0,246	0,296	0,345	0,394	0,443	0,493		
	4	0,057	0,114	0,171	0,228	0,284	0,341	0,398					
	5	0,064	0,127	0,191	0,254	0,318	0,382						
7.17	1	0,027	0,054	0,081	0,108	0,135	0,162	0,189	0,216	0,243	0,270	0,297	0,324
	2	0,038	0,076	0,115	0,153	0,191	0,229	0,267	0,306	0,344	0,382	0,420	0,458
	3	0,047	0,094	0,140	0,187	0,234	0,281	0,328	0,374	0,421	0,468		
	4	0,054	0,108	0,162	0,216	0,270	0,324	0,378					
	5	0,060	0,121	0,181	0,242	0,302	0,362						
7.53	1	0,026	0,051	0,077	0,103	0,129	0,154	0,180	0,206	0,232	0,257	0,283	0,309
	2	0,036	0,073	0,109	0,146	0,182	0,218	0,255	0,291	0,327	0,364	0,400	0,437
	3	0,045	0,089	0,134	0,178	0,223	0,267	0,312	0,357	0,401	0,446		
	4	0,051	0,103	0,154	0,206	0,257	0,309	0,360					
	5	0,058	0,115	0,173	0,230	0,288	0,345						
7.89	1	0,025	0,049	0,074	0,098	0,123	0,147	0,172	0,196	0,221	0,246	0,270	0,295
	2	0,035	0,069	0,104	0,139	0,174	0,208	0,243	0,278	0,313	0,347	0,382	0,417
	3	0,043	0,085	0,128	0,170	0,213	0,255	0,298	0,340	0,383	0,425		
	4	0,049	0,098	0,147	0,196	0,246	0,295	0,344					
	5	0,055	0,110	0,165	0,220	0,275	0,330						
8.25	1	0,023	0,047	0,070	0,094	0,117	0,141	0,164	0,188	0,211	0,235	0,258	0,282
	2	0,033	0,066	0,100	0,133	0,166	0,199	0,233	0,266	0,299	0,332	0,365	0,399
	3	0,041	0,081	0,122	0,163	0,203	0,244	0,285	0,326	0,366	0,407		
	4	0,047	0,094	0,141	0,188	0,235	0,282	0,329					
	5	0,053	0,105	0,158	0,210	0,263	0,315						
8.61	1	0,023	0,045	0,068	0,090	0,113	0,135	0,158	0,180	0,203	0,225	0,248	0,270
	2	0,032	0,064	0,096	0,127	0,159	0,191	0,223	0,255	0,287	0,318	0,350	0,382
	3	0,039	0,078	0,117	0,156	0,195	0,234	0,273	0,312	0,351	0,390		
	4	0,045	0,090	0,135	0,180	0,225	0,270	0,315					
	5	0,050	0,101	0,151	0,201	0,252	0,302						
8.97	1	0,022	0,043	0,065	0,086	0,108	0,130	0,151	0,173	0,195	0,216	0,238	0,259
	2	0,031	0,061	0,092	0,122	0,153	0,183	0,214	0,245	0,275	0,306	0,336	0,367
	3	0,037	0,075	0,112	0,150	0,187	0,225	0,262	0,299	0,337	0,374		
	4	0,043	0,086	0,130	0,173	0,216	0,259	0,303					
	5	0,048	0,097	0,145	0,193	0,242	0,290						

Zone où le débit de coupe est au delà des limites.

Dans cette partie, nous avons utilisé l'axe à plus grande vitesse, et nous essayons de regarder la validité du tableau 8. Nous prenons donc la vitesse de coupe minimale et en faisant augmenter l'épaisseur de copeau, sous profondeur de passe constante, nous observons les efforts de coupe et l'énergie de coupe correspondants. Ainsi, nous obtenons le graphique de la figure 89 qui montre les efforts de coupe moyens pour la vitesse de coupe minimale et une profondeur de passe de 2.0 mm.

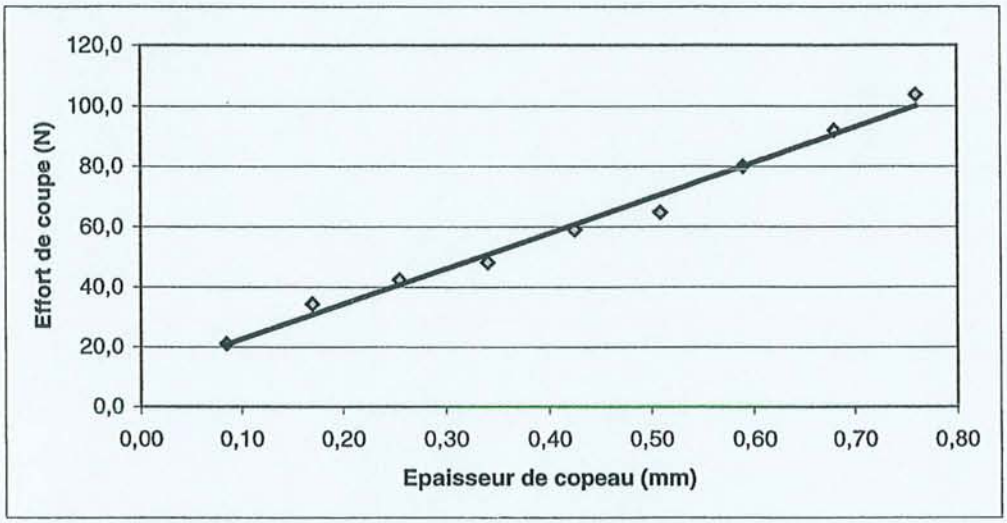


Figure 89 : Efforts de coupe à vitesse de coupe minimale dans la zone de validité résiduel (profondeur de passe = 2.0 mm)

Les résultats des écarts type sont dans le tableau 9.

Tableau 9 : écarts type des efforts de coupe (N) pour les essais de vitesse de coupe minimale (ap = 2.0 mm).

ec (mm) *	Moyenne (N)	Ecart type
0,09	21,06	1,337
0,17	34,42	2,758
0,26	42,39	2,044
0,34	48,26	3,201
0,43	59,07	4,011
0,51	64,83	3,957
0,59	80,04	4,097
0,68	91,94	3,424
0,76	103,74	1,609

Nota : nombre des observations par essai = 24.
* ec : épaisseur de copeau

Nous observons dans ce graphique une augmentation linéaire des efforts de coupe lorsque l'épaisseur de copeau est de plus en plus importante. Il est possible de distinguer deux groupes de points, chacun avec une pente différente. Le second groupe de points montre une augmentation de la pente dès 0.50 mm d'épaisseur de copeau. Les écarts types sont corrects, avec une erreur maximale de 8%.

Une deuxième série d'essais nous montre l'effet d'une augmentation de la profondeur de passe. Nous avons retenu les mêmes niveaux des vitesses d'avance, donc il se produit une variation de l'épaisseur de copeau. Les résultats sont dans la figure 90.

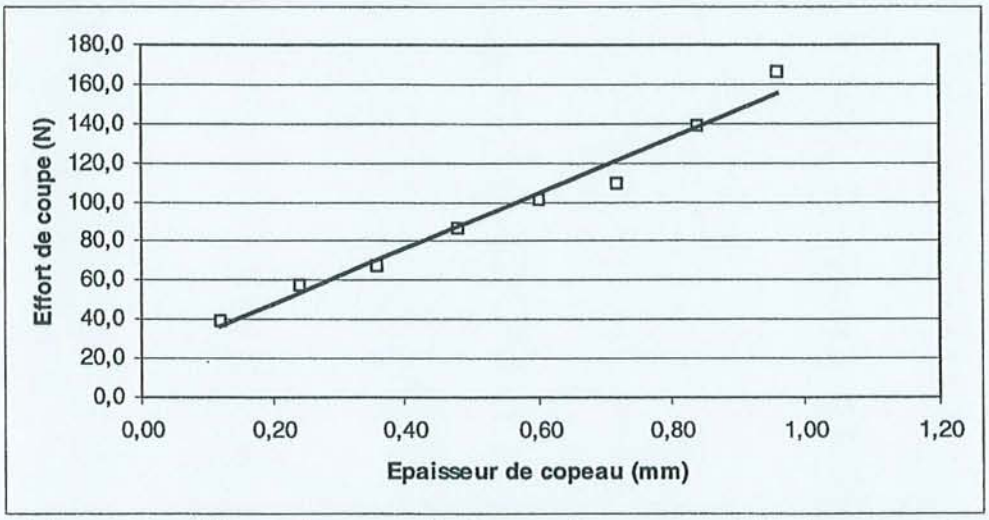


Figure 90 : Efforts de coupe à vitesse de coupe minimale, zone de validité résiduel et profondeur de passe de 4.0 mm.

Dans cette figure, nous observons un comportement similaire à la précédente. C'est à dire, deux groupes de points, formant chacun deux droites assez distinctives. Un décrochement de la courbe se produit cette fois pour une épaisseur de copeau de 0.70 mm. Ainsi, nous pouvons voir une augmentation régulière des efforts de coupe, avec un point limite où les efforts vont croître d'une façon violente. Ici nous sommes en présence d'une énergie de coupe avec une augmentation continue lorsque on atteint l'épaisseur de copeau maximale. Les écarts type trouvés sont dans le tableau 10.

Tableau 10 : écarts type des efforts de coupe (N) pour les essais de vitesse de coupe minimale (ap = 4.0 mm).

ec (mm) *	Moyenne (N)	Ecart type
0,12	38,96	2,212
0,24	57,62	2,708
0,36	68,03	4,560
0,48	86,70	7,386
0,60	101,65	14,527
0,72	110,10	12,683
0,84	138,55	7,481
0,96	166,04	11,115

Nota : nombre des observations par essai = 24.
* ec : épaisseur de copeau

Comme nous connaissons déjà le comportement des efforts de coupe, nous nous intéressons à l'énergie de coupe (Wc), que nous permet de mieux tracer les limites due à l'épaisseur de copeau et à la vitesse d'avance. Donc, nous avons pris les données de la figure 89 et nous déterminons l'énergie de coupe correspondante. Les résultats sont dans la figure 91.

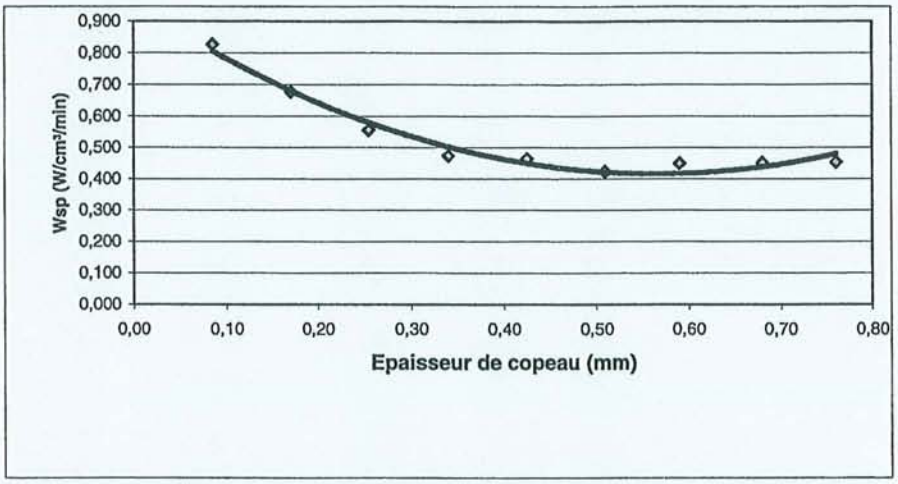


Figure 91 : Energie spécifique de coupe (W/cm³/min), dans la zone de validité résiduel (profondeur de passe : 2.0 mm)

Et les résultats en terme d'écarts type sont montrés dans le tableau 11.

Tableau 11 : écarts type de l'énergie spécifique de coupe (W/cm³/min). Vitesse de coupe minimale et ap = 2.0 mm.

ec (mm)	Moyenne	Ecart type
0,09	0,827	0,053
0,17	0,676	0,054
0,26	0,555	0,027
0,34	0,474	0,031
0,43	0,464	0,031
0,51	0,424	0,026
0,59	0,449	0,023
0,68	0,451	0,017
0,76	0,453	0,007

Dans la figure 91 nous observons que l'énergie de coupe nous permet de mieux identifier les limites des conditions d'usinage. Ici, nous trouvons, effectivement, pour une valeur de l'épaisseur de copeau de 0.50 mm, la courbe arrive à sa valeur la plus faible. A partir de ce point, elle commence à augmenter, ce qui correspond à deux zones d'efforts de coupe. Donc, pour ces conditions d'usinage nous pouvons établir une limite maximale pour l'épaisseur de copeau, avec une marge de sécurité raisonnable, pour une valeur d'entre 0.40 et 0.50 mm.

Finalement nous avons comparé tous les points mesurés, avec l'énergie spécifique de coupe de référence, laquelle a été déterminée dans le point 5.6. (pag.102), le résultat est dans la figure 92.

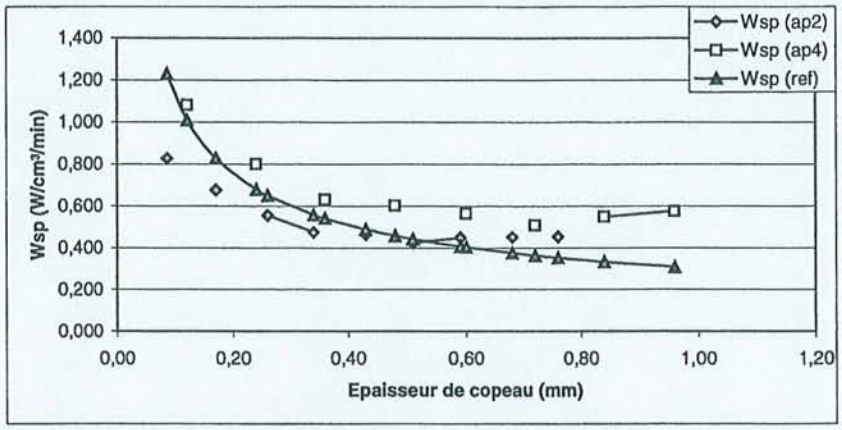


Figure 92 : Les énergies spécifiques de coupe par rapport à l'énergie de référence ($W_{sp,\ ref}$).

En regardant cette figure nous pouvons conclure que :

1. La détermination d'une énergie spécifique de coupe de référence doit être limitée par rapport aux conditions dans lesquelles l'usinage est réalisé.
2. Cela permet de donner un bonne approche théorique, cependant l'extrapolation vers des conditions différentes d'usinage donne des résultats divergents.
3. Il se produit une dispersion des points tout autour de la courbe de référence. Il faut noter que cette courbe a été générée d'après la vitesse de coupe et l'épaisseur de copeau minimale. Donc, un changement de ces conditions donne nécessairement une courbe décalé vers un niveau supérieur.
4. Les contraintes qu'il faut respecter sont de ne pas aller au delà de l'épaisseur de copeau maximum, ni de travailler avec une vitesse de coupe inférieure à la valeur minimale.

VI. CONCLUSIONS

L'objectif principal de cette recherche a été de montrer la faisabilité de l'application d'une méthodologie développée vers l'usinage des métaux dans la coupe du bois. Elle nous permet de fixer les limites des conditions de coupe de façon à travailler dans une zone de bonne coupe, avec pour résultats un état de surface correct de la pièce et une durée de vie maximale de l'arête de coupe. En effet, la méthode Couple Outil Matière permet de faire le choix de l'outil de coupe pour l'usinage d'une matière donnée. Cette méthode a été utilisée dans l'usinage de différents matériaux métalliques, permettant aux chercheurs de déterminer les conditions de coupe dans lesquelles l'usinage dévient problématique et ainsi limiter certains des paramètres de la coupe pour que les états de surface soient acceptables et l'usure minimale.

Dans le cas de l'usinage du bois, nous avons constaté l'absence de recherches tendants à faire le choix d'un outil de coupe pour une matière donnée et donner les limites dans laquelle l'outil peut travailler en sécurité. Les études réalisées dans le fraisage du bois montrent de façon subjective l'évaluation des surfaces résultantes puisque nous ne savons pas si les conditions de coupe se situent dans la zone correcte de travail.

Un problème très important que nous avons rencontré a été la connaissance du matériau. En effet, nous trouvons une généralisation pour les valeurs des coefficients d'essence qui ne prend pas en compte la variation de la densité due par exemple aux cernes de croissance ou aux différents couches de densité dans le profil des panneaux de fibres. Cette variation de densité donne naturellement des valeurs assez différentes pour le coefficient dans une même essence, donc des efforts de coupe normalement hétérogènes. La bibliographie ne montre pas la méthode de détermination des coefficients d'essence. Nous avons réalisé de ce fait, une série d'essais tendant à définir les valeurs correctes pour le matériau de notre recherche, le MDF.

Les résultats de ces essais nous permettent de souligner les points suivants :

- L'effet de la variation de la densité du MDF dans son profil, montre des efforts de coupe qui sont corrélés avec cette variation.
- Le type de coupe appliqué a une influence directe sur les efforts de coupe. Ainsi, une coupe ouverte donne des valeurs plus faibles qu'une coupe demi - ouverte.
- Le coefficient d'essence est dépendant de la densité et du type de coupe.
- Il est possible de déterminer les valeurs pour le coefficient d'essence si nous connaissons l'humidité du bois (dans la zone à usiner), l'effort de coupe résultant et le type de coupe. Les résultats nous ont montré que une fois l'effort de coupe mesuré pour une humidité donné, type de coupe étudié et une épaisseur de copeau donné, nous déduisons la valeur du coefficient avec la formule :

$$k_e = F_c / [(a + b * e_c) * ae] \qquad \text{(à humidité constante)}$$

Ainsi pour une valeur constante de la densité et l'humidité, le coefficient est constante si nous faisons varier l'épaisseur de copeau. Un changement du type de coupe ou de densité fait changer la valeur du coefficient. Si le coefficient a été déterminé correctement, il est possible donc de connaître à l'avance les efforts de coupe sous un épaisseur de copeau, un type de coupe et une densité donnée du matériau à usiner.

En ce qui concerne l'application du Couple Outil Matière, nos résultats nous permettent d'aboutir aux conclusions suivantes :

- La recherche du point de fonctionnement permet d'identifier clairement les facteurs qui ont une influence significative dans le choix des conditions de coupe.
- L'analyse Taguchi appliquée dans cette étape de la recherche du point de fonctionnement a été réalisée avec pour paramètre de réponse les efforts de coupe. Cependant, les réponses trouvées ne permettent pas d'établir quelles conditions de coupe sont les meilleures du fait du changement des facteurs d'usinage associés à une variation de l'épaisseur de copeau. Le facteur choisi a été l'avance par dent montrant une influence significative, tandis que la vitesse de coupe et la profondeur de passe sont restées sans changement.
- L'analyse de l'état de surface est fondamentale pour justifier tous les résultats trouvés. Ainsi, pour le point ci-dessus, cette analyse nous a permis de mieux comprendre le comportement des différents facteurs mis en œuvre.
- L'utilisation des trois paramètres : l'effort de coupe, l'état de surface et la puissance de coupe sont indissociables dans l'analyse des résultats. La prise en compte d'un des ces paramètres de façon isolé peut induire des conclusions erronées.

En ce qui concerne l'étude de l'usure, il est très important de noter que le moyen le plus pratique qui nous a permis de déterminer les limites de la longueur de bois usinée a été l'effort de coupe. Le rapport angulaire entre l'effort de coupe et l'effort tangentiel, a montré des caractéristiques très particulières nous permettant de définir trois zones d'évolution de l'usure pendant la coupe. Ainsi, l'angle entre ces deux composantes de l'effort de coupe nous montre une première zone d'usure rapide qu'atteint rapidement une stabilité. Cette stabilité, correspondant à une seconde zone, est maintenue pendant une grande distance d'usinage, pour arriver à la fin à la zone où l'usure est manifestée par une brusque diminution de l'angle.

En effet, nous trouvons que dans les premiers mètres usinés, l'arête de coupe sans usure et très fine à sa pointe, tend à se « briser » pour atteindre une géométrie plus stable, ce qui est le cas pour la seconde zone, les fluctuations de l'angle pour cette zone sont de $\pm 2°$. C'est à dire, la valeur moyenne pour l'effort normal tend à zéro et lorsqu'on atteint la troisième zone, l'angle se fait de plus en plus négatif. Nous sommes en présence d'une usure sur la face de dépouille de l'arête.

L'effet d'un changement dans les conditions de coupe, dans le cas, d'une augmentation de l'épaisseur de copeau, nous permet de conclure que :

1. La distance usinée pour atteindre une zone de stabilité est inférieure, donc l'effet usure est plus fort.

2. L'angle de stabilité fluctue autour de –5°, c'est à dire, l'effort normal termine chaque cycle de coupe avec une valeur moyenne négative.

3. Avec une épaisseur de copeau plus forte, la longueur usinée est diminuée d'environ 50%. Cependant, avec une prise de passe plus forte, la quantité de pièces usinées reste à peu près la même.

4. Le temps effectif d'usinage jusqu'à l'usure totale est d'environ 40% inférieur à celui d'une faible épaisseur de copeau.

5. Le critère état de surface permet de définir la qualité finale du produit par rapport à l'épaisseur de copeau choisi, et par conséquence, détermine la productivité.

L'effet d'une augmentation de la vitesse de coupe sous un épaisseur de copeau constante se traduit par une productivité plus importante, mais avec une usure plus rapide.

Ainsi, en récapitulatif :

1) Il est tout à fait possible d'utiliser le Couple Outil Matière pour le matériau bois, comme nous le confirment les résultats trouvés.

2) L'analyse de l'état de surface montre un caractère prépondérant pour le matériau bois.

3) L'analyse du Couple Outil Matière a pu être réalisée par l'étude de :

   - l'effort de coupe ou la puissance
   - l'état de surface.

4) Nous avons développé une nouvelle méthodologie de mesure de durée de vie d'outil.

UNIVERSITÉ NANCY 1 BIBLIOTHÈQUE SCIENCES

VII. LES PERSPECTIVES DU COUPLE OUTIL MATIERE

Les perspectives que nous attribuons à cette recherche doivent prendre compte de :

- Il existe aujourd'hui une méconnaissance des conditions optimales d'usinage dans toutes les essences (en France et ailleurs).
- L'usinage des produits d'une grand valeur ajouté ne peut pas se permettre de gaspiller la matière par de mauvaises réglages des machines.
- Le coûts fixes des machines sont de plus en plus élevés.
- Un mauvaise choix d'un outil peut causer l'arrêt de la production ou bien la mise en rebus de la pièce.

D'après ces points, nous pouvons établir des perspectives très intéressants dans la recherche sur le bois en appliquant la méthodologie Couple Outil Matière :

1. Etudier chaque essence et dérivés bois : les niveaux des efforts de coupe, puissance et état de surface. Les effets des changements des conditions d'usinage et l'influence de la densité, humidité et type de coupe pour ainsi définir correctement les coefficients d'essence et humidité.
2. Faire la recherche du COM dans les outils les plus couramment utilisés dans l'usinage de produits de haute valeur ajouté.
3. Faire l'application de l'usinage grande vitesse sous les contraintes imposées pour la méthode Couple Outil Matière, autrement les résultats peuvent induire des erreurs dangereuses due à des mauvaises sélections des conditions de coupe.
4. Il est tout à fait possible de faire la recherche du COM pour le matériau bois, les résultats trouvés sont satisfaisants. En plus, pour une recherche plus étendue il faudra considérer des vitesses de coupe plus adaptées aux vitesses d'avance disponibles (180m/min), la possibilité de travailler avec des outils d'une gamme de diamètre plus grand, un équipement pour mesurer en même temps les efforts de coupe et la puissance.

VIII. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

8.1. Publications scientifiques

[AGU96] Aguilera A. 1996. Qualification de l'usinage du bois massif de Fagus sylvatica L. (Hêtre) et Picea excelsa Link (Epicéa): efforts de coupe, puissance et qualité de surface. Rapport de DEA en Sciences du Bois. Université de Nancy I, ENSTIB. 46 pp.

[AGU99a] Aguilera A., Meausoone P.J. et Martin P. 1999. Wood material influence in routing operations : the MDF case. Holz als Roh-und Werkstoff. A paraître.

[AGU99b] Aguilera A., Meausoone P.J. et Martin P. 1999. Estimation de l'usure en défonçage par la mesure de l'évolution du rapport effort tangentiel / effort normal. Proceedings of the 14th International Wood Machinig Seminar. 12-19 septembre. Paris, Epinal, Cluny – France. Pages 19-29.

[ANS96] Anselmetti B. 1996. Surveillance de la coupe et CFAO. Journée PRIMECA: coupe et usinage, Nantes. pages 79-84.

[ARN96] Arnaud E., Bedrin C., Calderon J. et Roumery B. 1996. Caractérisation du couple outil matière. Application: carbure revêtu P15/acier 35 NCD16. Journée PRIMECA: coupe et usinage, Nantes. pages 91-96.

[ARB94] ARBOLOR. 1994. Le bois matériau d'ingénierie. Nancy, 433 pp.

[BAG96] Bagur F. 1996. Couple outil-matière: une méthode de conception et de choix des outils de coupe. Colloque International sur l'évolution des matériaux pour outils de coupe, Cercle d'Etudes des Métaux, E.N.S.M. St. Etienne, nov. 1996.

[BED97] Bédrin C., Arnaud F., Calderon J., Rigal J.F. et Roumesy B. 1997. Méthode de caractérisation des couples outils-matières pour l'usinage par outil coupant. Tehnomus IX, Editura Universitatii, Suceava, Romania, pages 45-62.

[BEN73] Bennett W. 1973. A total system concept. The problem defined. Proceedings of the 4th Wood Machining Seminar. Richmond, California. December 4-6. Pages 1-12.

[BRA96] Brady G., Martin P. et Charpentier P. 1996. Utilisation du concept d'entités d'usinage dans un contexte multi – utilisateurs. Application à la seconde transformation du bois. Computer Integrated Manufacturing and Automation Technology, CIMAT'96, pp 193-198, Grenoble, 29-31 mai 1996.

[CAL96] Calderon J., Bédrin C., Arnaud F., Play D. et Pellissier P. 1996. Caractérisation du couple outil-matière lors de l'usinage d'un alliage de titane Ti 10.2.3, First International Conference: IDMME'96, Nantes, France, avril 1996, pages 975-984.

[CHA58] Chardin A. 1958. Utilisation du pendule dynamométrique dans les recherches sur le sciage du bois. Bois et Forêts des Tropiques. N°58, pages 49-61.

[CHA68] Chardin A. et Froidure J. 1968. Etude de l'usure des dents de scie. Introduction. Centre Technique Forestier Tropical.

[COR79] Core H.A., Cote W.A. et Day A.C. 1979. Wood structure and identification. 2nd edition, Syracuse University Press, 182 pp.

[CYR95] Cyra G. et Tanaka C. 1995. On line control of router feed speed using acoustic emission. Proceedings of the 12th International Wood Machining Seminar. Kyoto, Japan. Pages 215-229.

[CYR95b] Cyra G. et Tanaka C. 1995 (b). The effects of wood fiber directions and tool wear on routing behaviors. Proceedings of the 12th International Wood Machining Seminar. Kyoto, Japan. Pages 401-411.

[DER95] Derras C. 1995. La modélisation par entités. Rapport de DEA production automatisée. Université de Nancy I.

[DET88] Detienne P. 1988. Cours illustré d'anatomie du bois. Centre technique forestier tropical, Département du CIRAD, Nogent-sur-Marne. Texte 23 pp.

[DEV91] Devries W.R. et Lemaster R.L. 1991. Processing methods and potential applications of wood surface roughness measurement. Proceedings of the 10th International Wood Machining Seminar. University of California, Berkeley. October 21-23. Pages 276-292.

[DRE86] Dret B. et Charloux T. 1986. Les nouveaux matériaux de coupe pour outils à bois. Revue du bois N°10. Pages 29-37.

[FRA58] Franz, N.C. 1958. Analysis of the wood-cutting process. Univ. of Michigan Press, Ann Arbor, Mich.

[FUR96] Furet B. et Paturange N. 1996. Détermination de protocoles d'utilisation du capteur d'efforts en perçage: Intellitool. Journée PRIMECA: coupe et usinage, Nantes. pages 119-124.

[GAM90] Groupe GAMA. 1990. La gamme automatique. Editions Hermés. Paris.

[GAR92] Garro O. 1992. Conception d'éléments physiques de système de production : application aux machines outils à architecture parallèle. Thèse Université de Nancy I.

[GIT97] Gittel H.J., Engl A., Lachenmayr G., Paul H.U. et Scholz F. 1997. Cutting data for particle board and MDF with PKD routing tools at high speeds. Proceedings of the 13th International Wood Machining Seminar. University of British Columbia, Vancouver, Canada. Pages 677-686.

[GON99] Goncalves M.T.T., Castro E.M. et Tiburcio U.F.O. 1999. Cutting performance on MDF (Medium Density Fiberboard) for orthogonal cut. Proceedings of the 14th International Wood Machining Seminar. Volume I, September 12-19, Paris, Epinal, Cluny. Pages 13-18.

[GRO96] Gross P., Eisen P., Duchanois G. et Triboulot P. 1996. Contrôle qualité et états de surface bois, TOPOSURF@ & TOPOVISE@, outils complémentaires de mesure des qualités de surface. Quatrième Colloque Sciences et Industries du Bois. 11-12-13 septembre 1996, Nancy.

[HEC95] Hecker M. et Becker G. 1995. Surface roughness of douglas fir veneer as a result of silviculture management. Abstracts of invited papers. IUFRO XX World Congress. August 6-12. Page 352.

[HIZ96] Hiziroglu S. 1996. Surface roughness analysis of wood composites: a stylus method. Forest Prod. J. 46(7/8):67-77.

[JAC73] Jacquiot C., Trenard Y. et Dirol D. 1973. Atlas d'anatomie des bois des angiospermes (essences feuillues). Centre technique du bois, Paris, t.1 texte, 175 p.

[JER93] Jerger E.L., Frick C. et Moellenbeck M. 1993. Significant parameters in the machining process which influence the surface quality of red oak. Proceedings of the 11th International Wood Machining Seminar. Honne, Norway. May 26. Pages 177-204.

[KIN95] King A.F., Stewart H.A. et Mazzola M.S. 1995. Electrical signals obtained from turning tests performed on medium density fiberboard. Proceedings of the 12th International Wood Machining Seminar. Kyoto, Japan. Pages 292-301.

[KIV50] Kivimaa E. 1950. Cutting force in woodworking. The State Institute for Technical Reaserch, Finland. Publication 18. 102 pp.

[KO99] Ko Pak Lim, McKenzie W., Cvitkovic R. et Robertson M.F. 1999. Parametric studies in orthogonal machining MDF. Proceedings of the 14th International Wood Machining Seminar. Volume I, September 12-19, Paris, Epinal, Cluny. Pages 1-12.

[KOC64] Koch P. 1964. Wood machining processes. A volume in the wood processing series. Edited by Frederick F. Wangaard, Yale University.

[LAM85] Lambert P. 1985. Réalisation d'un système de mesure d'états de surface pour le matériau bois - Profils - . DEA en Génie Electrique. Université de Nancy I. U.E.R. Sciences de la Matière. Laboratoire d'automatique et de commande numérique. 96 pp.

[LAV95] Lavery D.J., McLarnon D., Taylor J.M., Moloney S. et Atanackovic A. 1995. Parameters affecting the surface finish of planed stika spruce. Forest Prod.J. 45(4):45-50.

[LEB94] Leban J.M. et Triboulot P. 1994. Défauts de forme et états de surface. In: Le Bois Matériau d'Ingénierie. Editeur ARBOLOR. Pages 334-363.

[LEB96] Lebrun J. 1996. Apport de la méthode des éléments finis à la prévision des défauts résultant d'une opération d'usinage. Application au fraisage de face. Conservatoire National des Arts et Métiers. Nancy. Mémoire.

[LEF90] Lefur E. et Mathieu L. 1990. Méthodes d'optimisation sous contraintes appliquées à la détermination des conditions de coupe. In: La gamme automatique en usinage, groupe GAMA. Pages 143-159.

[LEM82] Lemaster R.L. et Dornfeld D.A. 1982. Measurement of surface quality of sawn and planed surfaces with a laser. Proceedings of the 7th Wood Machining Seminar. University of California, Richmond. October 18-20. Pages 54-61.

[LEM85] Lemaster R.L., Jouaneh M.K. et Yoo S.M. 1985. Determining product quality with optical scanners. Proceedings of the 8th Wood Machining Seminar. University of California, Berkeley. October 7-9. Pages 311-324.

[LER96] Leroy E. et Poire O. 1996. Détermination d'un couple outil matière (C.O.M.) dans le bois, étude de faisabilité sur du MDF. Rapport de projet, ENSTIB.

[LEV96] Levaillant G. 1996. La prédétermination des conditions et paramètres d'usinage : nécessité, méthodes, moyens. Journée PRIMECA: coupe et usinage, Nantes. Pages 103-110.

[MAR80] Martin, P. 1980. Commande adaptative de machines-outils. Etude d'un système d'optimisation de l'opération de tournage avec mesure de l'usure de l'outil. Thèse Docteur en Sciences, Université de Nancy I.

[MAR83] Marchal R. 1983. Intérêt de la prise en compte de caractéristiques physiques et anatomiques simples du bois de chêne pour l'appréciation de la qualité des placages d'ébénisterie. DEA Sciences du Bois, INPL, Nancy. 105 pp.

[MAR94] Martin P. et Sales C. 1994. Processus de coupe. In: Le Bois Matériau d'Ingénierie. Editeur ARBOLOR. Pages 289-309.

[MAR94b] Martin P. et Eisen P. 1994. Réalisation de plates-formes de tests de faisabilité industrielle dans le domaine du bois. Rapport de fin de contrat. Partenaire : CRITT Bois / MESR, 90 H 0611, Juin 1994.

[MAR96] Martin P. 1996. Approche ingénierie concourante en seconde transformation. Conception de produit et de systèmes de fabrication. 4e Colloque Sciences et Industries du Bois. Arbolor, ISBN 2-907086-08-1. Vol 1, pp 393-399, Nancy, 11/13 septembre 1996.

[MEA96] Meausoone P.J. 1996. Approche en ingénierie concourante pour les industries du bois. Thèse Université de Nancy I.

[MCK61] McKenzie W., 1961. Fundamental Analisis of the Wood Cutting Process. Dept. of Wood Tech., School of Natural Resources, University of Michigan, Ann Arbor.

[MCK67] McKenzie W., 1967. The basic wood cutting process. 2nd Wood Machining Seminar. University of California, Richmond. October 10-11. Pages 3-8.

[PAN81] Panshin A.J. et de Zeeuw C. 1981. Textbook of wood technology. 4th edition. McGraw – Hill Series in Forest Resources. 722 p.

[POU96] Poulachon G. 1996. Superfinition d'un acier inoxydable à l'outil coupant. Journée PRIMECA: coupe et usinage, Nantes. pages 71-77.

[RIC95] Richter K., Feist W.C. et Knaebe M.T. 1995. The effect of surface roughness on the performance of finishes. Part 1. Roughnees characterization and stain performance. Forest Prod. J. 45(7/8):91-97.

[RIG96] Rigal J.F. et Mehdi K. 1996. Modèles dynamiques du comportement des tubes minces en tournage. Journée PRIMECA: coupe et usinage, Nantes. pages 17-22.

[SAL85] Sales C. 1985. Knife wear during tropical hardwood planning. Proceedings of the 8th Wood Machining Seminar. University of California, Berkeley. October 7-9. Pages 99-106.

[SHE97] Sheikh-Ahmad J.Y. et McKenzie W.M. 1997. Measurement of tool wear and dulling in the machining of particleboard. Proceedings of the 13th International Wood Machining Seminar. University of British Columbia, Vancouver, Canada. Pages 659-672.

[SKA95] Skakic D., Krdzovic A. et Djorisic Z. 1995. The influence of mean chip thickness on main cutting force in moulding of hardwood species. Stroj - Nástroj - Obrobok. Nové poznatky v procese obrábania dreva. Technická univerzita vo zvolene drevárska fakulta. I medzinárodná konferencia. Nitra - Slovensko. Pages 131-140.

[STE85] Stewart H.A., Shatynski S.K., Harbison B. et Rabin B. 1985. High temperature corrosion of tungsten carbide from machining medium density fiberboard. Proceedings of the 8th Wood Machining Seminar. University of California, Berkeley. October 7-9. Pages 54-71.

[STE88] Stewart H.A., et Drawer P.O. 1988. Analysis of tool forces and edge recession after cutting medium density fiberboard. Proceedings of the 9th Wood Machining Seminar. University of California, Berkeley. October 7-9. Pages 320-341.

[STE93] Stewart H.A., Srinivasan S., Stiffler A.K. et Miller D.B. 1993. Electrical phenomena during turning tests on medium density fiberboard. Proceedings of the 11th International Wood Machining Seminar. Honne, Norway. Pages 115-128.

[STE97] Stewart H.A. 1997. Possible relationship between electrical discharge and tool wear from wood machining. Proceedings of the 13th International Wood Machining Seminar. University of British Columbia, Vancouver, Canada. Pages 673-676.

[TAN91] Tanaka C. 1991. Relationship between surface finish quality and acoustic emission count rate in circular sawing. Proceedings of the 10th International Wood Machining Seminar. University of California, Berkeley. October 21-23. Pages 308-316.

[TAE96] Tae-Il S., Depince P. et Hascoêt J.-Y. 1996. Déformation d'outil et compensation de trajectoires. Journée PRIMECA: coupe et usinage, Nantes. pages 125-129.

[TRI95] Triboulot P., Sales Ch., Zerizer A. et Martin P. 1995. Correlation of fracture toughness of bonded joints with quality (roughness) of knife - planed MDF surfaces. Holzforschung 49. Pages 465-470.

[USE75] Usenius A. 1975. Surface smoothness measurement of sawn timber. Paperi Ja Puu N°12.

[VIL96] Villeneuve F. 1996. Choix optimisé de fraises 2 tailles en interpolation circulaire ébauche. Journée PRIMECA: coupe et usinage, Nantes. pages 1-8.

[WES91] Westkämper E. 1991. New sawing and cutting technologies for the woodworking industry. Proceedings of Sawtech 91. Berkeley, California. Pages 201-223.

[ZER91] Zerizer A. 1991. Contribution à l'étude de l'usinabilité du MDF. Thèse Université de Nancy I en Sciences du Bois.

[ZHA91] Zhao C., Tanaka C., Nakao T. et Takahashi A. 1991. Relationships between surface-finish qualities and acoustic emission count rates in circular sawing II. Mokuzai Gakkaishi 37(5):434-440.

[ZHA92] Zhao C., Tanaka C., Nakao T., Nishino Y. et Takahashi A. 1992. Adaptive control optimization in band sawing II. Effects of grain direction on surface finish quality and acoustic emission signals. Mokuzai Gakkaishi 38(8):771-776.

8.2. Références industrielles

[AFN94] AFNOR 1994. Domaine de fonctionnement des outils coupants. Couple outil matière. Partie 4: mode d'obtention du couple outil matière en tournage. Indice de classement: E 66-520-4.

[AFN95] AFNOR 1995. Domaine de fonctionnement des outils coupants. Couple outil matière. Partie 5: application à la technologie de fraisage. Indice de classement: E 66-520-5.

[AFN95b] AFNOR 1995 (b). Domaine de fonctionnement des outils coupants. Couple outil matière. Partie 6: mode d'obtention du couple outil matière en fraisage. Indice de classement: E 66-520-6.

[CTB91] CTBA. 1991. Etat de l'art et évolutions des performances des machines d'usinage du bois travaillant par enlèvement de copeaux. 123 pp.

[CTB95] CTBA. 1995. MDF guide d'utilisation.

[TOO96] Société TOOL. 1996. Le Couple Outil Matière. Usinage par outils coupants. Société TOOL, Annecy.

IX. ANNEXES

9.1. Méthode d'obtention du Couple Outil Matière

9.2. Les formules de l'usinage

9.3. Détermination théorique de l'épaisseur moyenne de copeau

9.4. L'axe grande vitesse. Mode d'emploi.

9.5. Comportement mécanique du MDF

9.6. Statistiques des essais

9.1. METHODE D'OBTENTION DU COUPLE OUTIL - MATIERE.

(Coupe des métaux)

Matériel de mesure et d'essais

La détermination d'un COM est expérimentale exploitant les moyens de mesure et d'essais, indiquées ci-dessous:

Matériel nécessaire:

- une machine possédant des caractéristiques connues et répertoriées suffisantes pour les essais à réaliser;
- un appareil de mesure de puissance;
- un appareil de mesure de dureté;
- une binoculaire;
- un rugosimètre dans le cas d'un COM d'un outil de finition

Matériel recommandé:

- une table traçante pour suivre l'évolution de la puissance au cours de l'usinage;
- une instrumentation permettant la mesure des efforts d'usinage;
- une chaîne d'acquisition automatique des données précédentes;
- un tachymètre;
- un chronomètre;
- un appareil photographique;
- un matériel de mesures vibratoires.

On peut reconnaître quelques paramètres liés soit au fonctionnement de l'outil, à l'interaction des paramètres et au type de données de sortie. Ainsi pour décrire le fonctionnement d'un outil dans une matière, il faut utiliser 3 grands types de paramètres:

1. Les paramètres limites de couple (PLC): ils ont pour objectif d'encadrer les paramètres indépendamment les uns des autres entre un minimum et un maximum technologique (V_{cmin}, V_{cmax}). Leur utilisation enferme le fonctionnement de l'outil dans une plage définie. Donc, on a PLC géométriques et technologiques, les premières sont liés à une donnée géométrique de l'outil comme la hauteur maximale de coupe ou la largeur maximale de coupe et les autres sont obtenus soit par défaut, soit par essais, ainsi on peut avoir un avance minimum et/ou un avance maximum et une vitesse de coupe minimale.

2. Les paramètres de liaison (PLI): ils décrivent les paramètres indépendamment les uns des autres. Or, il existe une interaction entre les différents paramètres du COM. Les Paramètres de Liaisons sont donc destinés à décrire cette interaction, c'est à dire la section de coupe maximale qui relie les 2 PLC ap_{max} et ae_{max}; les exposants et constante de Taylor. Leur utilisation est dans le COM, les PLI permettent de tronquer la zone utilisable définie par les PLC. L'obtention est soit par défaut, par recherche d'essais limites ou par essais de durée de vie.

3. Les paramètres auxiliaires (PAX): Permettent la calcul rapide des puissance, couple et efforts, c'est à dire K_c, m, γ, a, b, c. L'obtention est par défaut ou par essais spécifiques aux paramètres recherchés (essais de puissance, d'efforts, etc.)

Programme d'essais

Il comporte six étapes:
- essai de qualification;
- détermination de $V_{c,min}$;
- détermination de la plage e_{Cmin}- e_{Cmax};
- détermination des données limites;
- essais d'usure;
- détermination des paramètres auxiliaires.

Détermination du C.O.M. - Essai de qualification

Recherche d'un point de fonctionnement: a pour but de trouver un point de fonctionnement correct et stable, c'est à dire que: a) le copeau généré est acceptable; b) la puissance de coupe consommée est compatible avec le résultat du calcul de puissance effectué avec les ordres de grandeurs des énergies spécifiques connues; c) l'outil ne s'écroule pas au bout de quelques secondes; d) un léger changement d'un des 4 paramètres de coupe, nous permet de retrouver un point de fonctionnement qui respecte encore les 3 points cités ci-dessus.

L'objectif est d'assurer que l'outil est compatible avec la matière et l'usinage demandé et servir de point de départ à la série d'essais envisagée. Il a pour méthodologie de définir un point de fonctionnement acceptable et stable. Un point de fonctionnement défini en vitesse de coupe, avance par dent, profondeur de passe, largeur de coupe est acceptable si:

- la forme et la couleur du copeau généré sont stables et répétitives;
- les énergies spécifiques de coupe trouvées sont compatibles avec l'usage attendu;
- la durée de vie de l'outil est compatible avec l'usage attendu;
- l'état de surface est compatible avec l'usage attendu;
- l'outil ne présente pas de mode de dégradation à caractère catastrophique.

Un point de fonctionnement défini en vitesse de coupe, avance par dent, profondeur de passe, largeur de coupe est stable si une variation de faible amplitude d'un ou plusieurs des quatre paramètres (V_c, f_z, ap, ae) du point en question permet de trouver un autre point de fonctionnement acceptable.

Détermination de $V_{c,min}$

Essai de V_{cmin}: a pour but de rechercher la vitesse de coupe en - dessous de laquelle l'usinage devient problématique voir impossible. Pour ce faire, on part de la vitesse du point de qualification légèrement augmentée (de 20 %) et de l'épaisseur de copeau du point de qualification. La profondeur de passe "ap" et la largeur de passe "ae" sont celles du pointe de qualification. On réalise plusieurs passes en diminuant la vitesse de coupe à chaque fois, et en calculant d'après les mesures de puissance, l'énergie spécifique de coupe. Si l'on trace sur un graphique, après chaque essai, l'énergie spécifique de coupe, on remarquera qu'en deçà d'une certaine vitesse, l'énergie spécifique de coupe se met à croître brusquement. On décidera alors de fixer le V_{cmin} à une vitesse légèrement supérieure à celle où se produit le décrochement de la courbe.

L'objectif est de rechercher une limite basse de la vitesse de coupe (V_c) afin de poursuivre la série d'essais dans la plage de V_c adaptée.

Il faut prendre comme point de départ les paramètres d'usinage suivants:

1) ap = ap du point de fonctionnement;
2) ae = ae du point de fonctionnement;
3) $f_z = f_z$ du point de fonctionnement.

Réaliser une série d'essais couvrant une plage de vitesses de coupe incluant la vitesse de coupe du point de fonctionnement.

Pour chaque point testé:

- mesurer systématiquement la puissance de coupe et calculer l'énergie spécifique de coupe;
- au besoin mesurer l'état de surface;
- contrôler que l'outil ne présente pas de mode de dégradation à caractère catastrophique;
- noter tous les phénomènes perturbateurs qui peuvent apparaître et parfois interrompre les essais.

Pour les traitements il faut reporter les valeurs d'énergie spécifique de coupe et/ou d'état de surface sur un graphe W_{sp} et/ou état de surface en fonction de V_c. Il doit apparaître dans la majorité des cas un décrochement assez brutal de W_{sp} et/ou de l'état de surface en fonction de V_c. Le calage du $V_{c,min}$ se fait par rapport au décrochement de la courbe en prenant toutefois une marge de sécurité. Dans le cas où il n'y a pas de décrochement net de la courbe ni de désordres d'état de surface interprétables directement on peut se fixer une variation limite de W_{sp} ou de l'état de surface.

Détermination de la zone ec_{min} - ec_{max}

L'objectif est de rechercher une limite basse et haute d'épaisseurs de copeau (ec_{min} - ec_{max}) afin de poursuivre la série d'essais dans la plage d'épaisseurs de copeau adaptée.

Il faut prendre comme point de départ les paramètres d'usinage suivants:

1) ap = ap du point de fonctionnement;
2) ae = ae du point de fonctionnement;
3) $V_c \geq V_{c,min}$.

Réaliser une série d'essais couvrant une plage d'épaisseurs de copeau incluant l'épaisseur de copeau du point de fonctionnement calculée en utilisant les formules suivantes:

si ae < D/2 : $e = 2f_z \sqrt{(ae/D)(1 - ae/D)}$ (1)

si ae ≥ D/2 : $ec = f_z$ (2)

Pour chaque point testé:

- mesurer systématiquement la puissance de coupe et calculer l'énergie spécifique de coupe;
- au besoin mesurer l'état de surface;
- contrôler que l'outil ne présente pas de mode de dégradation à caractère catastrophique;
- noter tous les phénomènes perturbateurs qui peuvent apparaître et parfois interrompre les essais.

Pour le traitement il faut reporter les valeurs d'énergie spécifique de coupe et/ou d'état de surface sur un graphe W_{sp} et/ou état de surface en fonction de e. Il doit apparaître dans la majorité des cas un décrochement assez brutal de W_{sp} et/ou de l'état de surface en fonction de e vers les valeurs minimales. Le calage du ec_{min} se fait par rapport au décrochement de la courbe en prenant toutefois une marge de sécurité.

Dans le cas où il n'y a pas de décrochement net de la courbe ni de désordres d'états de surface interprétables directement vers les valeurs minimales, on peut se fixer une variation limite de W_{sp} ou de l'état de surface. Lorsqu'il apparaît un décrochement de W_{sp} et/ou de l'état de surface en fonction de e vers les valeurs maximales, le calage du ec_{max} se fait par rapport au décrochement de la courbe en prenant toutefois une marge de sécurité. Dans le cas où il n'y a pas de décrochement net de la courbe ni de désordres d'états de surface interprétables directement vers les valeurs maximales, on peut se fixer une valeur maximale de e par acceptation du copeau généré ou apparition de phénomènes perturbateurs.

Détermination des données limites

Recherche des conditions max: a pour but de rechercher les limites physiques de l'outil en contrainte. Trois essais sont à réaliser:

➢ recherche de la section maximum coupée: on part des conditions moyennes de vitesse et d'avance; rechercher les limites géométriques atteignables.
➢ recherche du débit maximum coupée: on part de ces limites géométriques et l'on augmente progressivement l'avance.
➢ recherche d'entrée en vibrations: essai pratiqué surtout pour les fraises de petits diamètres. On réalise un fraisage latéral sous faible largeur de coupe en augmentant progressivement la vitesse de rotation jusqu'à détecter une entrée en vibration.

Leur objectif est de rechercher une limite haute de section de coupe ($A_{D,max}$) et de débit de copeaux (Q_{max}). Les valeurs de $ap_{,min}$, $ap_{,max}$, $ae_{,min}$, $ae_{,max}$, seront définies à partir de données géométriques et affinées de préférence par des essais de coupe.

Obtention de $A_{D,max}$

Il faut prendre comme point de départ les paramètres d'usinage suivants:

1) ap = ap du point de fonctionnement;
2) ae = ae du point de fonctionnement;
3) $V_c \geq V_{c,min}$;
4) $ec \geq ec_{min}$.

Réaliser une série d'essais en faisant évoluer ap et/ou ae afin de déterminer $A_{D,max}$.
La relation permettant d'obtenir A_D est la suivante:

$$A_D = ap * ae \qquad (3)$$

Pour chaque point testé:

➢ mesurer systématiquement la puissance de coupe et calculer l'énergie spécifique de coupe;
➢ contrôler que l'outil ne présente pas de mode de dégradation à caractère catastrophique;
➢ noter tous les phénomènes perturbateurs qui peuvent apparaître et parfois interrompre les essais.
➢ calculer A_D.

NOTE: les mesures de puissance et d'énergie seront utilisées pour la détermination des paramètres auxiliaires.

Lorsque l'on obtient un mode de dégradation à caractère catastrophique ou un phénomène perturbateur non imputable à la machine, l'essai est terminé. Noter la valeur obtenue pour A_D. Choisir une valeur $A_{D,max}$ en prenant, s'il y a lieu, une marge de sécurité.

Obtention de Q_{max}

Il faut prendre comme point de départ les paramètres d'usinage suivants:

1) ap = ap obtenu pour $A_{D,max}$;
2) ae = ae obtenu pour $A_{D,max}$;
3) $V_c = V_c$ utilisé pour $A_{D,max}$;
4) ec = ec utilisé pour $A_{D,max}$.

Réaliser une série d'essais en augmentant régulièrement ec jusqu'à ec_{max} si possible. Si ec_{max} est atteint, réaliser alors une deuxième série d'essais en augmentant régulièrement V_c (sous ec = ec_{max}).

Les relations permettant d'obtenir Q sont les suivantes:

$$Q = A_D * V_f / 1000 \quad (4)$$
$$Q = A_D * f_z * Z_u * N / 1000 \quad (5)$$
$$Q = A_D * f_z * Z_u * V_c / \pi / D \quad (6)$$

Pour chaque point testé:

➢ mesurer systématiquement la puissance de coupe et calculer l'énergie spécifique de coupe;
➢ contrôler que l'outil ne présente pas de mode de dégradation à caractère catastrophique;
➢ noter tous les phénomènes perturbateurs qui peuvent apparaître et parfois interrompre les essais.
➢ calculer Q.

NOTE: les mesures de puissance et d'énergie seront utilisées pour la détermination des paramètres auxiliaires.

Lorsque l'on obtient un mode de dégradation à caractère catastrophique ou un phénomène perturbateur non imputable à la machine, l'essai est terminé. Noter la valeur obtenue pour Q. Choisir une valeur Q_{max} en prenant une marge de sécurité.

Mesures de puissance: ont pour but le paramétrage du modèle de puissance. Pour ce faire, on exploite les différentes mesures réalisées lors des précédents essais, et à l'aide d'un logiciel, on calculées différents paramètres utilisés dans la formule de puissance. On peut aussi réaliser 7 essais d'usinage en faisant varier à chaque fois la vitesse de coupe, l'avance par dent, ainsi que la largeur de coupe. Pour chaque essai on relève la puissance de coupe, et à l'aide d'un logiciel, on calculé différents paramètres utilisés dans la formule de puissance.

Mesure d'efforts: ont pour but de déterminer les paramètres de la formule d'efforts. Pour ce faire, on exploite les différentes mesures réalisées lors des précédents essais, et à l'aide d'un logiciel, on calculé différents paramètres utilisés dans la formule d'efforts. On peut aussi réaliser une série de passes en faisant varier la

largeur de passe à chaque fois pour des conditions moyennes (ap, N, f_z), et à l'aide d'un logiciel, on calculé différents paramètres utilisés dans la formule d'efforts.

Essais d'usure

Il a pour but le paramétrage du modèle d'usure et la remise en cause éventuelle de la zone de validité de l'outil, car, en certains points validés par les essais précédents, la "dérive" du modèle d'usure peut s'avérer inadmissible. Pour ce faire, il faut réaliser différents essais d'usinage en faisant varier à chaque fois les paramètres de coupe afin de pouvoir déterminer à l'aide d'un logiciel les différents paramètres utilisés dans la formule de Taylor. Pour chaque essai, il faudra s'assurer que les paramètres de coupe sont valides, c'est à dire que les différents points de fonctionnement respectent les plages de validités précédemment trouvées. Ces essais d'usure impliquent donc de surveiller l'évolution de l'usure de l'outil ainsi que celle des autres paramètres (augmentation de l'énergie spécifique de coupe, détérioration de l'état de surface) et, en fonction des critères de réforme, décider d'arrêter l'usinage et mesurer le temps total d'usinage pour l'essai. Muni des durées de vies de ces différents essais, on peut alors calculer par logiciel les différents paramètres de la formule de Taylor.

Pour différents points d'utilisation respectant les limites déterminées aux points précédents, déterminer les exposants et constantes de Taylor assortis des paramètres permettant de déterminer la fiabilité et les limites des résultats trouvés.

Modèle de Taylor généralisé:

$$ap^{F} * f_z^{E} * (ae / D)^{D} * T^{G} * V_c = C \qquad (7)$$

Réaliser au moins huit essais d'usure pour pouvoir appliquer une méthode statistique. Tous les points sélectionnés doivent répondre aux critères suivants:

- posséder une vitesse de coupe supérieure ou égale à $V_{c,min}$;
- posséder une épaisseur de copeau dans la plage ec_{min} - ec_{max};
- posséder une profondeur de passe dans la plage $ap_{,min}$ - $ap_{,max}$;
- posséder une largeur de coupe dans la plage $ae_{,min}$ - $ae_{,max}$;
- posséder une section de coupe inférieure ou égale à $A_{D,max}$;
- posséder un débit de copeau inférieur ou égale à Q_{max}.

Pour chaque point (ap, ae, f_z, V_c) choisi, l'usinage doit être poursuivi jusqu'à l'obtention de la durée de vie limite de l'outil. Les principaux critères de réforme observables sont:

- mode d'usure en dépouille;
- augmentation de la puissance de coupe;
- augmentation des efforts de coupe;
- détérioration de l'état de surface;
- non - respect des dimensions de la pièce;
- autres causes de dysfonctionnement.

Les puissances de coupe en fin de chaque point seront enregistrées. Contrôler que l'outil ne présente pas de mode de dégradation à caractère catastrophique. Noter tous les phénomènes perturbateurs qui peuvent apparaître et parfois interrompre les essais. Les essais devront être menés de telle façon que les plages des différents paramètres soient balayées, notamment pour le point choisi pour Q_{max}. Les durées d'arêtes obtenues devront couvrir une plage compatible avec l'usage attendu.

Utiliser une méthode de résolution des systèmes surdéterminés permettant le calcul:

- des exposants de Taylor D, E, F et G;
- de la constante de Taylor C;
- de l'écart type et de l'écart type réduit de la constante C.

Le modèle de Taylor généralisé n'est pas une modélisation physique du phénomène de coupe. L'analyse critique des résultats obtenus par la méthode précédente est indispensable.

NOTE: la démarche suivante peut être utilisée:

(1) analyse de l'écart type réduit: si celui-ci est supérieur à 0.05, cela indique probablement qu'un ou plusieurs essais font diverger le modèle. Supprimer le ou les essais correspondants et recommencer les calculs. Il convient d'avoir toujours au moins six essais pour pouvoir tirer des conclusions sur la valeur de l'écart type réduit;

(2) analyse du ou des essais supprimés: sauf erreur d'expérimentation, un essai faisant diverger le modèle est révélateur d'une limite atteinte. L'analyse de ces essais permet alors:

- de recaler, si besoin, $A_{D,max}$ ou Q_{max};
- de fixer T_{min} et/ou T_{max};

afin d'assurer la cohérence de fonctionnement du modèle choisi.

Essais de détermination des paramètres auxiliaires

L'objectif est de déterminer W_{sp} et m_c de sorte à pouvoir évaluer les puissances, couples et efforts tangentiels engendrés par la coupe.

Les modèles retenus sont:

$$W_{sp} = P_c / Q \qquad (8)$$

$$W_{sp} = W_{sp,ref} * (ec_{ref} / ec)^{m_c} \qquad (9)$$

En règle générale, les données provenant des essais précédents permettent de paramétrer ce modèle; si cependant il faut quelques points de mesure supplémentaires, tous les points sélectionnés doivent respecter les conditions suivantes:

- posséder une vitesse de coupe supérieure à $V_{c,min}$;
- posséder une épaisseur de copeau dans la plage ec_{min} - ec_{max}.

Pour le traitement il faut se fixer une référence d'épaisseur de coupe:

- ec_{max} ou la valeur standard 1 mm/dent.

Utiliser une méthode de résolution des systèmes surdéterminés permettant le calcul:

- de $W_{sp,ref}$ et de m_c;
- de l'écart type et de l'écart réduit sur $W_{sp,ref}$.

Le modèle ne prend pas en compte la variation de la profondeur de passe et de la largeur de coupe sur la variation de l'effort spécifique de coupe. L'écart type inclut donc à la fois des incertitudes de mesure et les imperfections du modèle. Son interprétation peut s'appuyer sur les valeurs calculées lors des essais d'épaisseur de copeau et de données maximales.

Nota : d'après Normes AFNOR E 66-520-6

9.2. LES FORMULES DE L'USINAGE

avance par dent f_z

$$f_z = \frac{V_f}{Z * N}$$

épaisseur maximale de copeau e_{max}
(en rabotage)

$$e_{max} = 2 * f_z * \sqrt{ap / D}$$

épaisseur moyenne de copeau e_m
(en rabotage)

$$e_m = f_z * \sqrt{ap / D}$$

effort de coupe par cm de largeur du copeau F_o
(coupe B ou 90-0)

$$F_o = 40 + 120 * e_m$$

$$F_o = a + b * e_m$$

effort de coupe sur une dent F_c

$$F_c = F_o * K_h * K_e * ae$$

puissance de coupe P_c
(en rabotage)

$$P_c = Z * N * F_c * \sqrt{ap * D}$$

travail spécifique de coupe W_{sp}

$$W_{sp} = \frac{P_c}{ae * ap * V_f}$$

Nomenclature:

f_z : pas d'usinage ou avance par dent (mm)
V_f : vitesse d'avance (m/mn)
Z : nombre de couteaux
N : vitesse de rotation (tr/mn)
e_{max} : épaisseur maximale de copeau (mm)
e_m : épaisseur moyenne de copeau (mm)
ap : profondeur de passe (mm)
D : diamètre de l'outil (mm)
W_{sp} : énergie de coupe unitaire ou travail spécifique de coupe (W/cm³/mn)

F_o : effort par cm de largeur du copeau (N/cm)
F_c : effort de coupe (Newton)
K_h : coefficient d'humidité
K_e : coefficient d'essence
ae : largeur de coupe (mm)
P_c : puissance de coupe (kW)

9.3. Détermination théorique de l'épaisseur moyenne de copeau

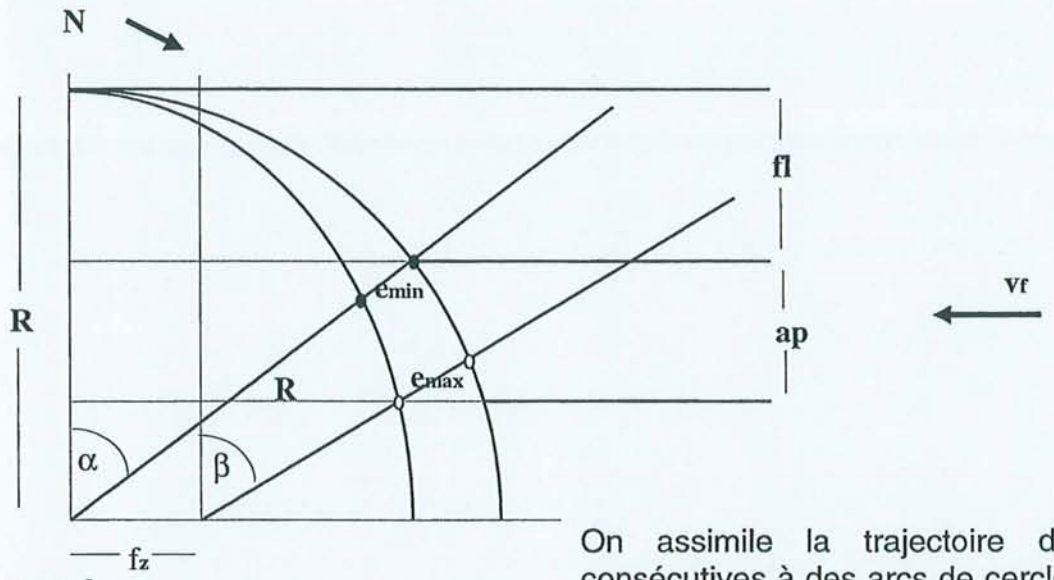
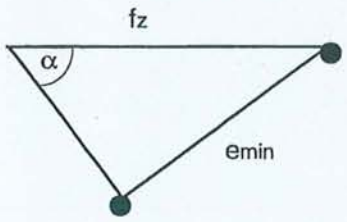


Figure A

On assimile la trajectoire de 2 dents consécutives à des arcs de cercle décalés de fz, donc e_{min} et e_{max} petits par rapport à R.

Pour l'épaisseur minimale, on a :



$$\sin \alpha = \frac{e_{min}}{f_z} \Rightarrow e_{min} = f_z * \sin \alpha \qquad (1)$$

Donc, d'après la figure "A":

$$\cos \alpha = \frac{R - fl}{R + e_{min}{}^*} = \frac{R - fl}{R} = 1 - fl / R \qquad (2)$$

* avec $e_{min} \Rightarrow 0$

$$e_{min} = f_z \sin \text{Arccos}\,(1 - fl / R) \qquad (3)$$

avec fl / R petit

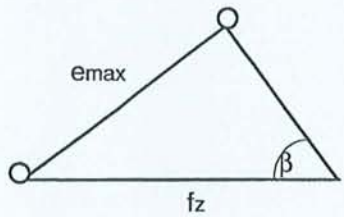
$$e_{min} = f_z \sqrt{1 - (1 - fl / R)^2} \qquad (4)$$

$$\approx f_z \sqrt{2\, fl / R} \qquad (5)$$

$$\sin\alpha = \sqrt{2fl / R} \qquad (6)$$

$$e_{min} = 2f_z \sqrt{fl / D} \qquad (7)$$

Pour l'épaisseur maximale, on a :



$$\sin\beta = \frac{e_{max}}{f_z} \Rightarrow e_{max} = f_z * \sin\beta \qquad (8)$$

$$\cos\beta = \frac{R - fl - ap}{R - e_{max}^{***}} = 1 - (fl + ap) / R \qquad (9)$$

*** avec $e_{max} \Rightarrow 0$

$$\cos^2\beta = \{1 - 2((fl + ap) / R) + ((fl + ap) / R)^2\}^{****} \qquad (10)$$

**** avec $((fl+ap)/R)^2 \Rightarrow 0$

on sait que:

$$\sin\beta = \sqrt{1 - \cos^2\beta} \qquad (11)$$

en remplaçant (10) en (11)

$$\sin\beta = \sqrt{2 (fl + ap) / R} \qquad (12) \qquad \text{avec } 2R = D$$

$$\sin\beta = \sqrt{4 (fl + ap) / D} \qquad (13)$$

ainsi, en remplaçant (13) en (8):

$$e_{max} = 2f_z \sqrt{(fl + ap) / D} \qquad (14)$$

Dans le cas de rabotage ou fraisage **fl = 0**, donc:

si on remplaçe en **(7)** $\Rightarrow$ $\mathbf{e_{min} = 0}$

et: si on remplaçe en **(14)** $\Rightarrow$ $e_{max} = 2f_z \sqrt{ap / D}$

ainsi, approximativement l'épaisseur moyenne de copeau est:

$\mathbf{e_{moy} = (e_{min} + e_{max}) / 2}$ donc, $\mathbf{e_{moy} = f_z \sqrt{ap / D}}$

9.4. Axe grande vitesse

Exécution du programme

Pour exécuter le programme souhaité il faut suivre les pas suivantes :

Travail sous hyperterminal

1. Démarrer hyperterminal
2. Dans la fenêtre « description de la connexion » entrer un nom (exemple : connexion 01) et choisir une icône pour la connexion.
3. Fenêtre « numéro de téléphone » se connecter en utilisant : diriger vers COM2
4. Fenêtre « propriétés COM2 »

   Configuration des paramètres pour COM2 :

Bits par seconde	38400
Bits de données	8
Parité	aucun
Bits d'arrêt	1
Contrôle de flux	aucun

5. Dans la fenêtre « connexion 01 » (nom de la connexion) :

   Fichier ⟹ Propriétés ⟹ Propriétés de « connexion 01 » ⟹ Onglet paramètres ⟹ touche Configuration ASCII ⟹ activer « reproduire localement les caractères tapés ».

6. Créer un raccourci dans le bureau pour « connexion 01 »

7. Ouvrir Wordpad, dans fichier sélectionner « nouveau ou ouvrir »

8. Charger le programme souhaité

9. Dans édition, sélectionner tout et copier

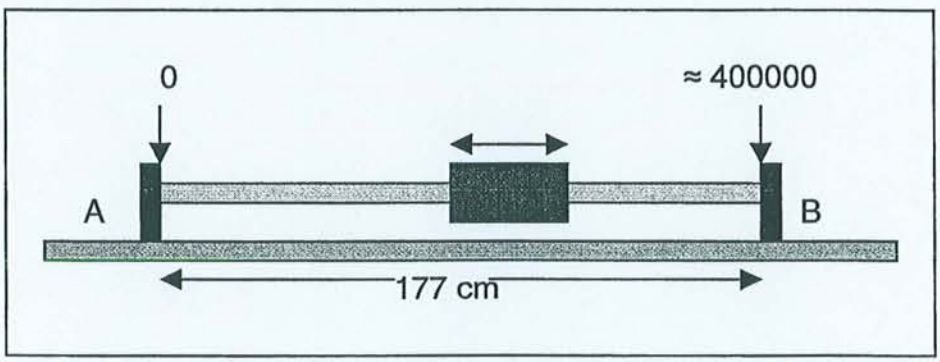
10. Dans hyperterminal « connexion 01 », faire édition, coller vers l'hôte et exécuter le programme.

Exemples des programmes

A écrire dans Wordpad et coller vers hyperterminal.

Programme 1.x

```
prog_list [4]=
tempo[4]=2
:g :
pos_c[x] ?
if (tempo [4]>0)g
vit_d[x]=150000
accel_d[x]=3000000
var[1]=250000
:r :
var[0]=var[1]
:a :
mvt[x], var[0]
:c :
if (profil [x]=on)c
prog[4]=off
end
```




```
prog_list [5]=
vit_d[x]=150000
accel_d[x]=3000000
var[1]=25000
:t :
var[0]=var[1]
:s :
mvt[x], var[0]
:u :
if (profil [x]=on)c
prog[5]=off
end
```

Observations : ce programme comporte deux sous programmes, le numéro 4 que fait le déplacement de « B » vers « A », et le numéro 5 à l'inverse.
Le programme « 4 » se déclenche avec un temporisateur réglé à 2sec (ligne 2 à 5).

La position maximale de déplacement est de environ 400000 pas.
Pour tout programme l'accélération maximale ne doit pas excéder de 5000000.

Conversion des unités

Les unités de mesure pour la vitesse de déplacement, accélérations et positions sont données en « pas ». Ainsi 1 pas = 4 microns.

Exemples : 12500 pas

12500 * 4 = 50000 µ / 1000 = 50 mm

donc vit_d[x] = 12500 ≡ 0.05 m/s ≡ 3.0 m/min

la vitesse est exprimée en « pas/s »
l'accélération en « pas/s² »
et la distance en « pas »

Une vitesse de 50000 est donc équivalente à 0.20 m/s (12.0 m/min)
Un distance de 50000 = 200 mm (0.2 m)

Quelques autres exemples

Vf (m/min)	vit_d[x]
2	8333
4	16667
6	25000
8	33333
10	41667
12	50000
14	58333
16	66667
18	75000

Présentation général du système de commande numérique

Le système de commande numérique est du type CAX321 que permet de contrôler le moteur électrique et 10 entrées et 8 sorties logiques, pouvant faire fonctionner jusqu'à 10 programmes en même temps.

Les principales fonctions sont :

- ACCEL_C[x] ⟹ c'est l'accélération courante du driver de moteur

  Syntaxe : ACCEL_C[x] ?
  Réponse : >ACCEL_C[x] : 100

- ACCEL_D[x] ⟹ c'est l'accélération demandée pour les prochaines déplacements.

  Syntaxe : ACCEL_D[x] = 200

  Syntaxe : ACCEL_D[x] ?
  Réponse : >ACCEL_D[x] : 100

- MVT[x] ⟹ permet d'effectuer un déplacement en utilisant VIT_D[x] , ACCEL_D[x] et REL[x].

- POS_C[x] ⟹ c'est la position du driver de moteur (position de référence)

  Syntaxe : POS_C[x] = 1200

  Syntaxe : POS_C[x] ?
  Réponse : >POS_C[x] : 1200

- POS_R[x] ⟹ c'est la position réelle du moteur

  Syntaxe : POS_R[x] = 0.0

  Syntaxe : POS_R[x] ?
  Réponse : >POS_R[x] : 10.0

- PROG[0] ⟹ permet de déclencher l'exécution d'un programme. Les indices des programmes peuvent être de 0 à 9.

  Syntaxe : PROG[0] = ON

  Syntaxe : PROG[0] ?
  Réponse : >PROG[0] : ON

- PROG_LIST[0] ⟹ permet de programmer une suite de commandes qui s'exécuteront automatiquement lorsque leur exécution sera demandée.

  Syntaxe : PROG_LIST[0] =
  Syntaxe : PROG_LIST[0] ?

- REL[x] ⟹ c'est le mode relatif. Si ce mode est ON les mouvements seront effectués en relatif.

  Syntaxe : REL[x] = ON
  Syntaxe : REL[x] ?
  Réponse : >REL[x] : OFF

- TEMPO[1] ⟹ Les temporisations sont des compteurs que l'on précharge avec une valeur exprimée en secondes, et dont la valeur diminue jusqu'à 0.

  Syntaxe : TEMPO[1] = 5.0
  Syntaxe : TEMPO[1] ?

- VAR[1] ⟹ ce sont des variables dans lesquelles il est possible de stocker des valeurs calculées ou lues dans un compteur ou une entrée.

  Syntaxe : VAR[1] = 10.0
  Syntaxe : VAR[1] ?
  Réponse : >VAR[1] : 10.0

- VIT_C[x] ⟹ permet de connaître la vitesse de commande du système, c'est à dire la vitesse sur laquelle le contrôleur essaie d'asservir le moteur.

  Syntaxe : VIT_C[x] ?
  Réponse : >VIT_C[x] : 100.0

- VIT_D[x] ⟹ c'est la vitesse de consigne que l'opérateur a envoyée. Ce sera la vitesse maximum d'un déplacement absolu ou relatif.

  Syntaxe : VIT_D[x] = 1000
  Syntaxe : VIT_D[x] ?
  Réponse : >VIT_D[x] : 1000

- VIT_R[x] ⟹ c'est la vitesse réelle du moteur.

  Syntaxe : VIT_R[x] ?
  Réponse : >VIT_R[x] : 1001.02

9.5. Etude du comportement mécanique du MDF ISOROY

(Réalisé à partir du Rapport de Projet ENSTIB 1993-1994 par GUILMEAU F. et SOUVAY L.)

Le profil de densité : l'objectif est de trouver le rapport entre le module d'Young (E) et la densité (ρ) pour chaque couche du panneau et estimer le module de flexion, traction et compression.

D'après Isoroy, le profil de densité corresponde au modèle :

$$\rho = p\, e^4 + q\, e^2 + r$$

où e est la position dans l'épaisseur du panneau à partir d'un de ses bords.

Le modèle trouvé est :

$$E = \rho\, (0.00639\, \rho - 0.867)$$

Et plus simple

$$E = 0.0055\, \rho^2$$

La validation du modèle pour un panneau d'épaisseur 45 mm :

	Modèle	Réalité
E (flexion)	4384	4137
E (traction)	3493	
E (compression)	2612	

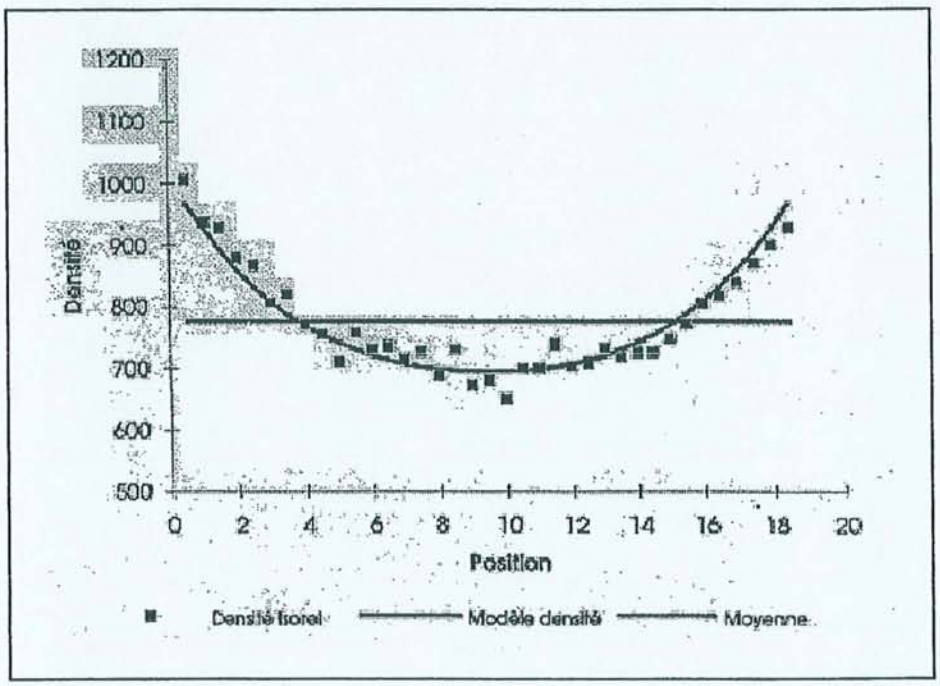
Pour un panneau de 19 mm d'épaisseur :

	Modèle	Réalité
E (flexion)	4115	4004
E (traction)	3404	3040
E (compression)	3246	256(*)

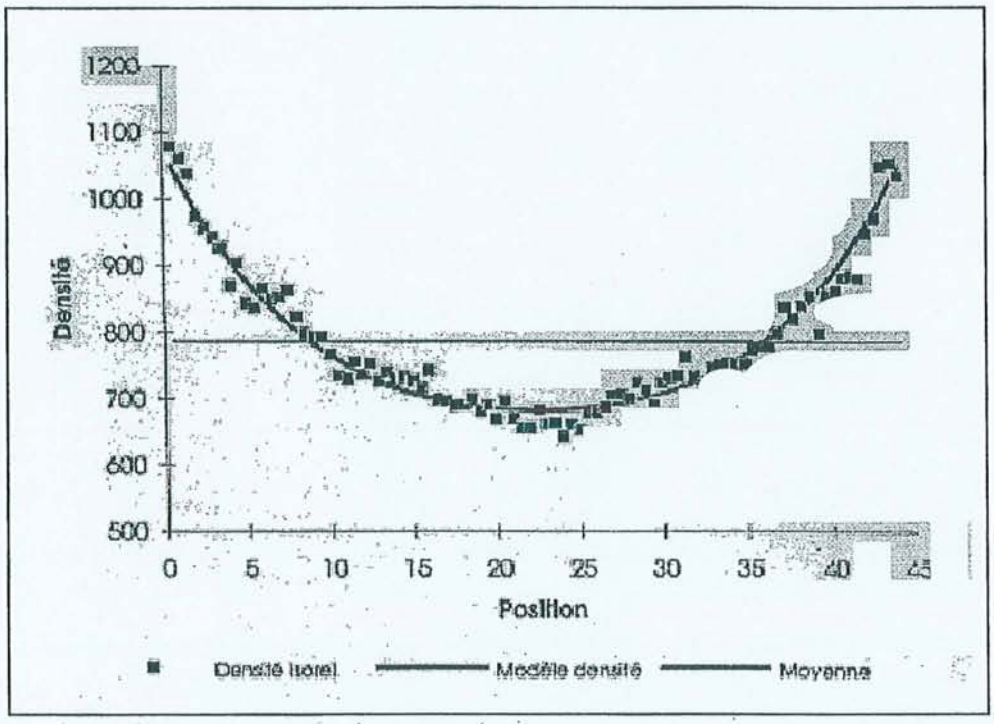
(*) ceci implique que le panneau n'est pas isotrope dans les trois directions.

Le modèle permet d'exprimer E en fonction de ρ et donne des valeurs proches de la réalité. Donc, le profil de densité a une influence directe sur les propriétés mécaniques de MDF, et ainsi, en appliquant ce modèle, une baisse de la densité moyenne s'accompagne d'une baisse des modules de compression, mais d'un meilleur module de flexion.

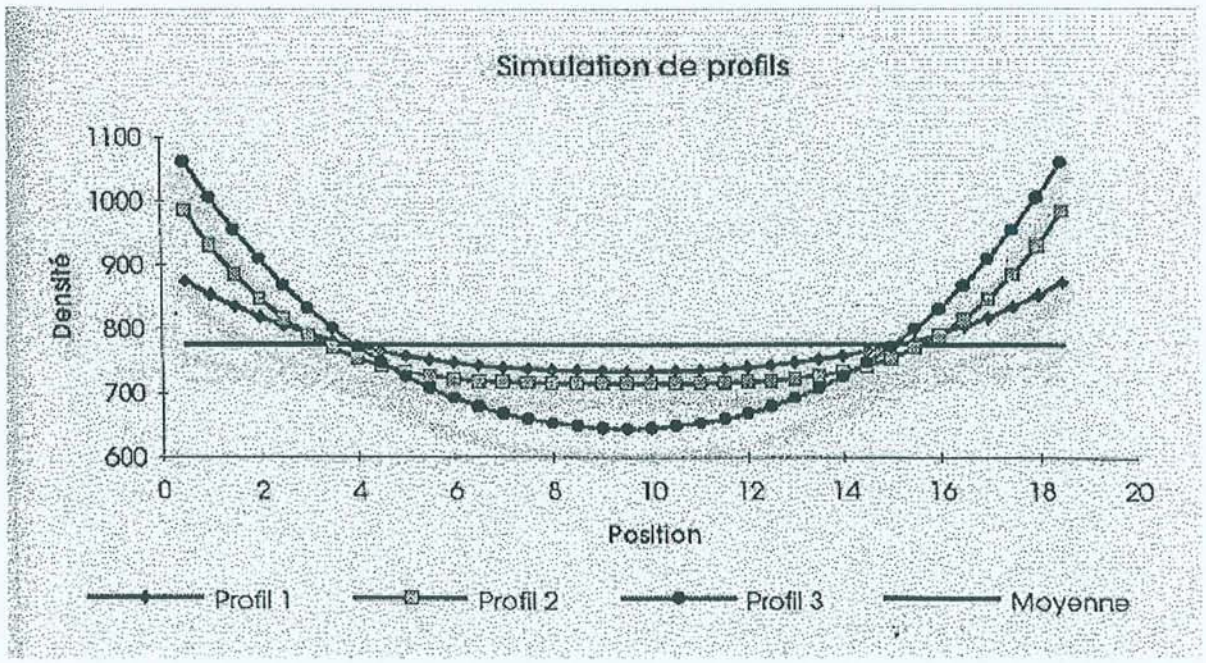
	Panneau de 19 mm	
	Moyenne	Modèle
Densité moyenne	775	775
Module de flexion	3303	4115
Module de traction	3303	3404
Module de compression	3303	3246
Coefficients du modèle		
p	0	0.01763
q	0	1.92826
r	775	695



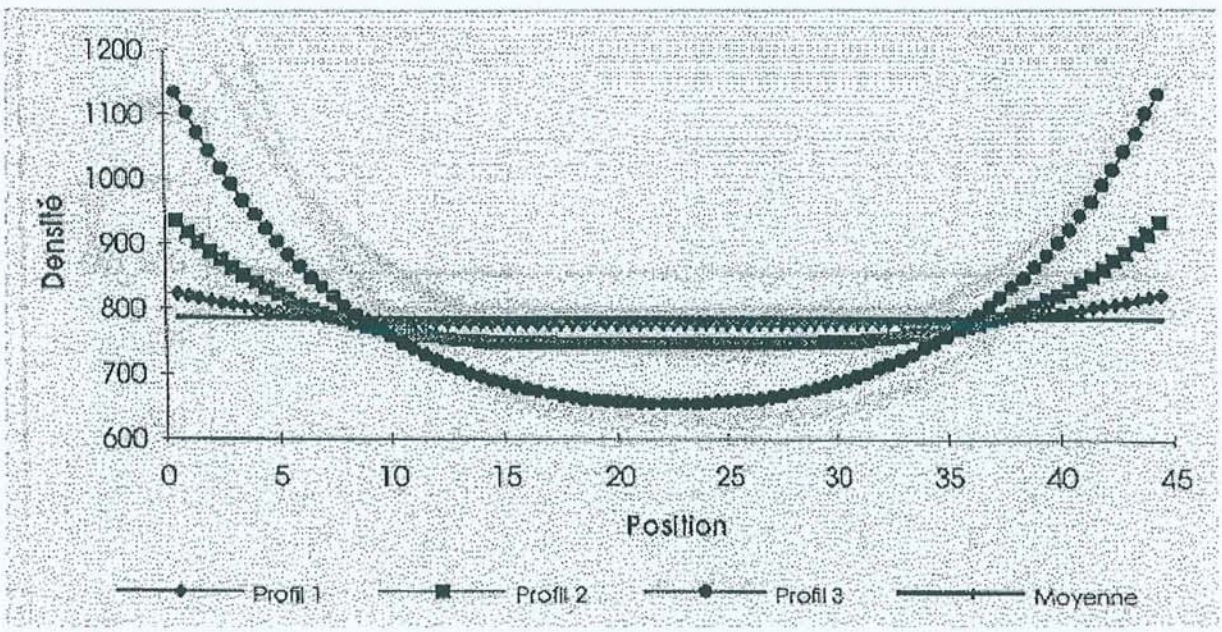
	Panneau de 45 mm	
	Moyenne	Modèle
Densité moyenne	786	786
Module de flexion	3398	4384
Module de traction	3398	3493
Module de compression	3398	3258
Coefficients du modèle		
p	0	0.00069
q	0	0.42132
r	786	683



	Panneau de 19 mm			
	Moyenne	Profil 1	Profil 2	Profil 3
Densité moyenne	775	775	775	775
Module de flexion	3303	3702	4112	4614
Module de traction	3303	3347	3414	3489
Module de compression	3303	3303	3262	3127
Coefficients du modèle				
p	0	0.009	0.04	0.018
q	0	1	0.09	3.7
r	775	734	715	644



	Moyenne	Panneau de 45 mm Profil 1	Profil 2	Profil 3
Densité moyenne	786	786	786	786
Module de flexion	3398	3511	3852	4738
Module de traction	3398	3410	3432	3547
Module de compression	3398	3406	3372	3161
Coefficients du modèle				
p	0	0.0002	0.0008	0.001
q	0	0.0002	0.0006	0.51
r	786	777	747	653



Essais mécaniques MDF

1. Essai de traction : détermination du module d'élasticité et contrainte de rupture sous un effort de traction exercé parallèlement aux faces de l'éprouvette.
2. Essais de flexion : détermination du module d'élasticité et contrainte de rupture en flexion.
3. Essais en compression

Résultats

1. traction :

$$\text{Module de élasticité } E = \frac{P^*}{e\, b\, \Delta l/l} \qquad \text{Contrainte de rupture } \sigma = \frac{P}{e\, b}$$

P* : augmentation de charge produisant un accroissement de l'allongement relatif $\Delta l/l$ (daN)
P : charge de rupture (daN)
e : épaisseur de l'éprouvette (cm)
b : largeur de l'éprouvette (cm)

section S = 21 * 5 = 105 mm²
E = L/S * raideur
L = 328 mm

Essai	Module E (MPa)	Δl (mm)	Contrainte de rupture (MPa)	Raideur (kN/mm)
1	2893	2.39	17.22	0.926
2	2661	2.25	15.06	0.852
3	3061	2.23	16.64	0.980
4	3036	2.13	15.74	0.972
5	2986	2.06	15.30	0.956
6	3077	2.20	16.27	0.985
7	2968	2.37	16.98	0.950
moyenne	2955	2.23	16.17	0.946

2. flexion :

épaisseur a = 1.6 cm
largeur b = 1.9 cm
longueur L = 310 mm

Résultats :

Essai	Module (MPa)	Contrainte de rupture (MPa)	Force max. appliquée (kN)
1	3447.3	37.8	0.395
2	3351.2	38.3	0.400
3	3320.9	34.5	0.361
4	3339.8	36.2	0.379
5	3400.8	38.6	0.404
6	3301.8	33.1	0.346
7	3367.8	36.9	0.387
8	3441.9	39.6	0.414
9	3413.3	32.9	0.345
10	3401.4	35.6	0.373
Moyenne	3378.6	36.5	0.380
Ecart type	50.0	2.3	0.024

BIBLIOTHÈQUE SCIENCES * UNIVERSITÉ NANCY 1 *

3. compression :

épaisseur a = 15 mm
largeur b = 19 mm
longueur L = 69 mm

compression axiale

essai	force max (kN)	déplacement (mm)	raideur (kN/mm)
1	8.185	1.48	8.704
2	8.193	1.43	8.976
3	8.317	1.40	2.853
4	8.513	1.52	8.995
5	8.435	1.40	3.322
6	8.365	1.41	6.329
7	7.549	1.34	8.578
8	8.282	1.47	3.834
9	7.686	1.30	6.331
10	8.097	1.42	8.783
11	8.969	1.53	3.695
12	8.607	1.41	9.375
13	8.623	1.42	4.959
14	8.663	1.54	9.565
15	8.735	1.45	4.582
16	7.742	1.30	8.799
17	8.526	1.48	6.716
moyenne	8.323	1.429	6.729

compression longitudinale

essai	force max (kN)	déplacement (mm)	raideur (kN/mm)
1	90.28	5.59	19.216
2	90.28	7.38	10.002
3	90.28	7.56	3.634

La contrainte de rupture en compression $\sigma = F / S$; avec $S = 19 * 15$

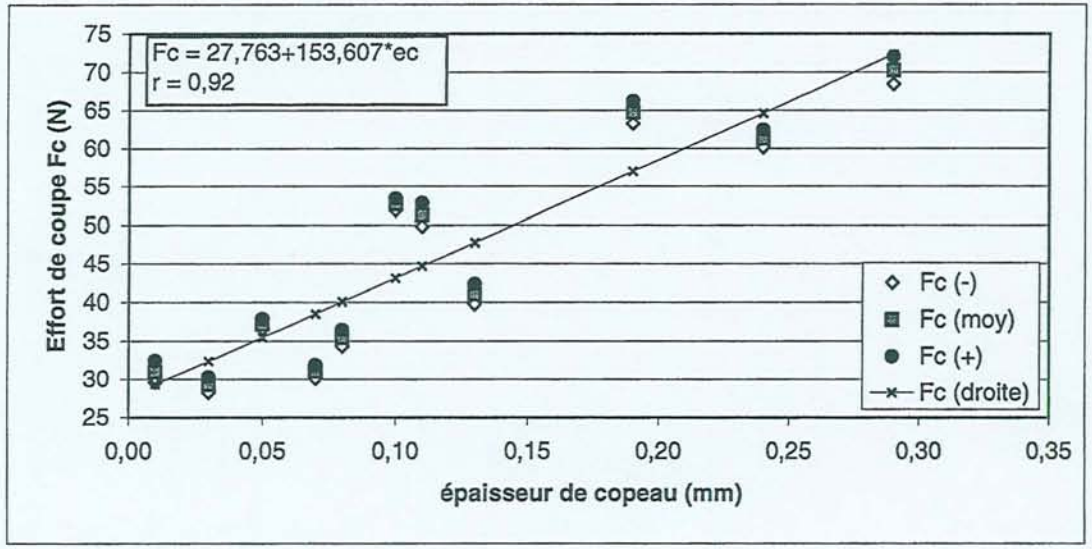
$$\sigma = 27 \text{ MPa}$$

Essais de détermination de la vitesse de coupe minimale (m/s)

Essais des efforts de coupe (N) :

essai	moyenne	écart type	n	t	E	erreur (%)
vc1	70,227	4,213	24	2,069	1,78	2,53
vc2	61,291	2,649	23	2,074	1,15	1,87
vc3	64,735	3,439	24	2,069	1,45	2,24
vc4	41,045	3,020	24	2,069	1,28	3,11
vc5	51,288	2,994	18	2,110	1,49	2,90
vc6	52,644	1,720	24	2,069	0,73	1,38
vc7	35,399	2,461	23	2,074	1,06	3,01
vc8	30,978	2,130	24	2,069	0,90	2,90
vc9	37,238	1,439	24	2,069	0,61	1,63
vc10	29,251	2,392	23	2,074	1,03	3,54
vc11	30,983	3,290	23	2,074	1,42	4,59

ec (mm)	Fc (-)	Fc (moy)	Fc (+)	Fc (droite)
0,29	68,448	70,227	72,006	72,31
0,24	60,145	61,291	62,437	64,63
0,19	63,283	64,735	66,187	56,95
0,13	39,770	41,045	42,320	47,73
0,11	49,799	51,288	52,777	44,66
0,10	51,918	52,644	53,370	43,12
0,08	34,335	35,399	36,463	40,05
0,07	30,078	30,978	31,878	38,52
0,05	36,630	37,238	37,846	35,44
0,03	28,217	29,251	30,285	32,37
0,01	29,560	30,983	32,406	29,30



essai	N (tr/mn)	vf (m/mn)	Vc (m/s)
vc1	12000	9,0	8,61
vc2	11000	7,0	7,89
vc3	10000	5,0	7,17
vc4	9000	3,0	6,46
vc5	8800	2,6	6,31
vc6	8600	2,2	6,17
vc7	8400	1,8	6,03
vc8	8200	1,4	5,88
vc9	8000	1,0	5,74
vc10	7800	0,6	5,60
vc11	7600	0,2	5,45

Paramètres d'usinage constantes:

D = 14 mm Z = 1

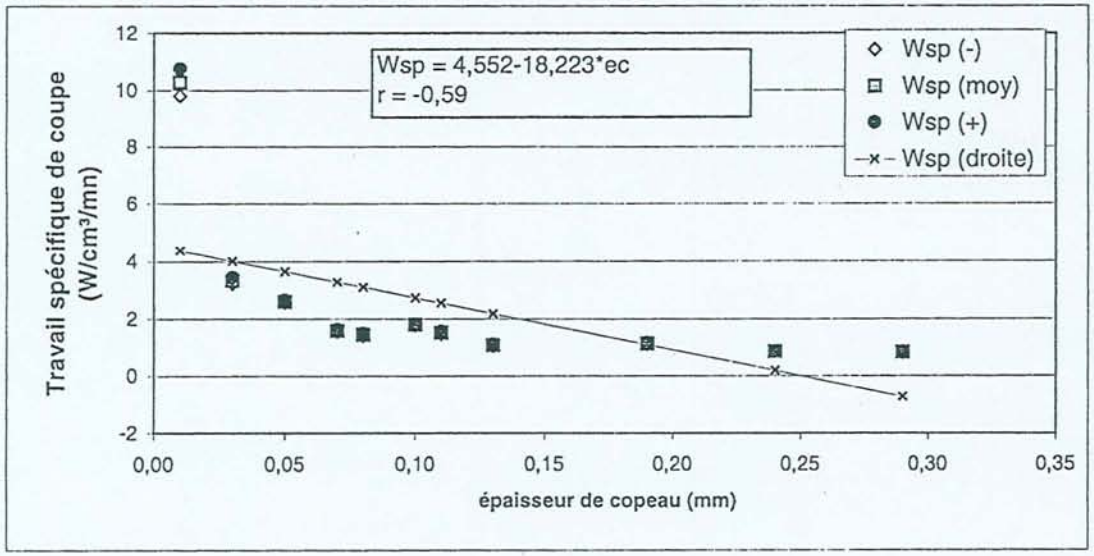
ap = 2,0 mm ae = 5,0 mm

E = t * écart type

Essais d'énergie de coupe (W/cm³/mn)

essai	moyenne	écart type	n	t	E	erreur (%)
vc1	0,817	0,049	24	2,069	0,02	2,53
vc2	0,840	0,036	23	2,074	0,02	1,85
vc3	1,130	0,060	24	2,069	0,03	2,24
vc4	1,074	0,079	24	2,069	0,03	3,11
vc5	1,514	0,088	18	2,110	0,04	2,89
vc6	1,795	0,059	24	2,069	0,02	1,39
vc7	1,441	0,100	23	2,074	0,04	3,00
vc8	1,583	0,109	24	2,069	0,05	2,91
vc9	2,599	0,100	24	2,069	0,04	1,62
vc10	3,318	0,271	23	2,074	0,12	3,53
vc11	10,271	1,091	23	2,074	0,47	4,59

ec (mm)	Wsp (-)	Wsp (moy)	Wsp (+)	Wsp (droite)
0,29	0,796	0,817	0,838	-0,73
0,24	0,824	0,840	0,856	0,18
0,19	1,105	1,130	1,155	1,09
0,13	1,041	1,074	1,107	2,18
0,11	1,470	1,514	1,558	2,55
0,10	1,770	1,795	1,820	2,73
0,08	1,398	1,441	1,484	3,09
0,07	1,537	1,583	1,629	3,28
0,05	2,557	2,599	2,641	3,64
0,03	3,201	3,318	3,435	4,01
0,01	9,799	10,271	10,743	4,37



essai	N (tr/mn)	vf (m/mn)	Vc (m/s)
vc1	12000	9,0	8,61
vc2	11000	7,0	7,89
vc3	10000	5,0	7,17
vc4	9000	3,0	6,46
vc5	8800	2,6	6,31
vc6	8600	2,2	6,17
vc7	8400	1,8	6,03
vc8	8200	1,4	5,88
vc9	8000	1,0	5,74
vc10	7800	0,6	5,60
vc11	7600	0,2	5,45

Paramètres d'usinage constantes:

D = 14 mm Z = 1

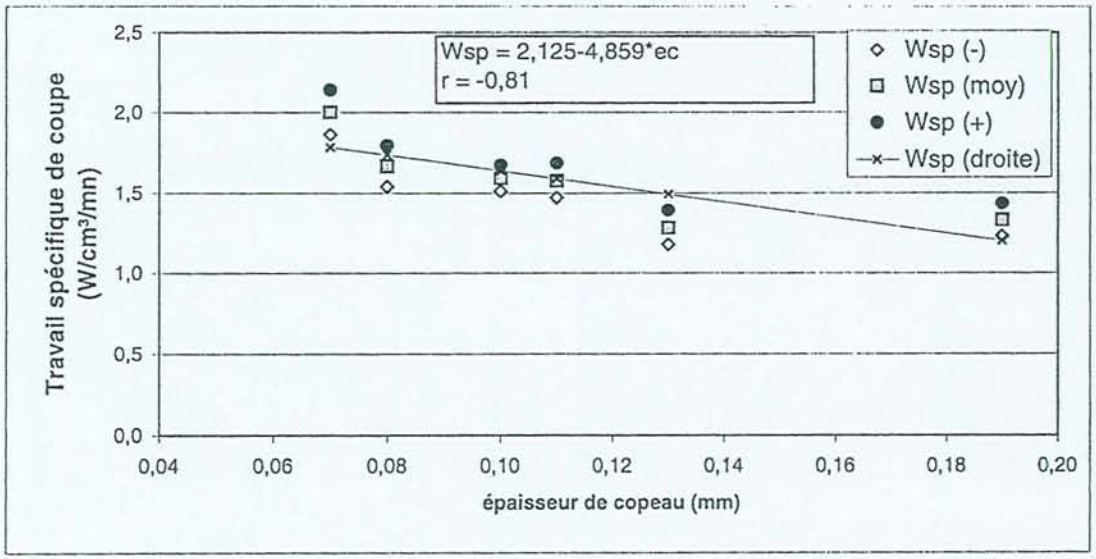
ap = 2,0 mm ae = 5,0 mm

E = t * écart type

Essais puissance de coupe (W)

essai	moyenne	écart type	n	t	E	erreur (%)
vc3	1,330	0,064	4	3,182	0,10	7,63
vc4	1,283	0,067	4	3,182	0,11	8,27
vc5	1,577	0,066	4	3,182	0,11	6,68
vc6	1,591	0,051	4	3,182	0,08	5,09
vc7	1,667	0,080	4	3,182	0,13	7,64
vc8	2,000	0,086	4	3,182	0,14	6,84

ec (mm)	Wsp (-)	Wsp (moy)	Wsp (+)	Wsp (droite)
0,19	1,228	1,330	1,432	1,20
0,13	1,177	1,283	1,389	1,49
0,11	1,472	1,577	1,682	1,59
0,10	1,510	1,591	1,672	1,64
0,08	1,540	1,667	1,794	1,74
0,07	1,863	2,000	2,137	1,79



essai	vf (m/mn)	Vc (m/s)
vc3	5,0	7,17
vc4	3,0	6,46
vc5	2,6	6,31
vc6	2,2	6,17
vc7	1,8	6,03
vc8	1,4	5,88

essai	Pv (W)	Pt (W)	Pc (W)
vc3	457	524	67
vc4	412	450	39
vc5	404	445	41
vc6	395	430	35
vc7	390	422	32
vc8	378	406	28

Paramètres d'usinage constantes:

D = 14 mm Z = 1

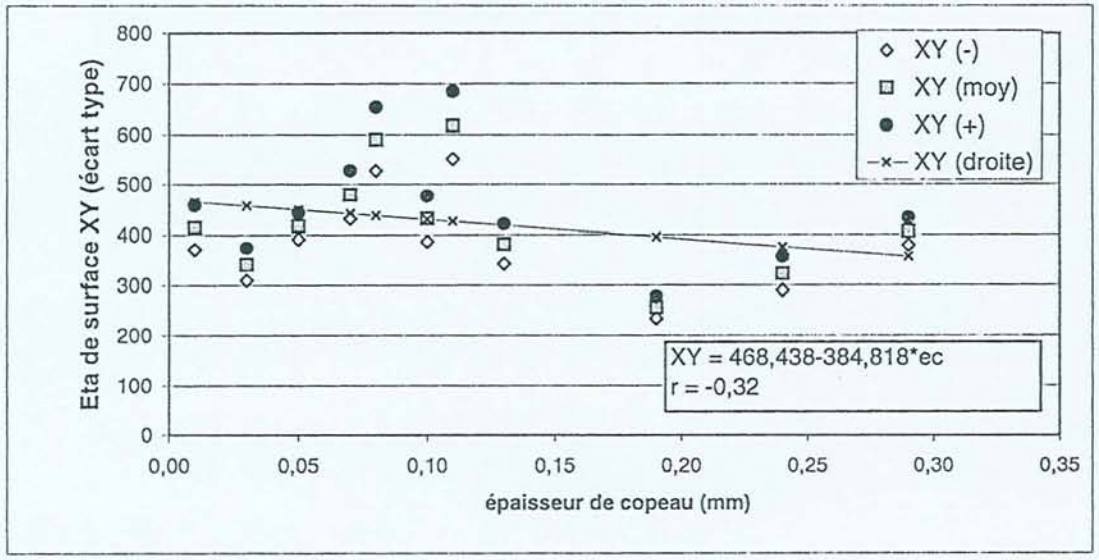
ap = 2,0 mm ae = 5,0 mm

E = t * écart type

Essais états de surface

essai	moyenne	écart type	n	t	E	erreur (%)
vc1	405,20	16,8	4	3,182	26,73	6,60
vc2	322,46	21,2	4	3,182	33,73	10,46
vc3	255,22	13,7	4	3,182	21,80	8,54
vc4	381,32	24,4	4	3,182	38,82	10,18
vc5	617,30	42,3	4	3,182	67,30	10,90
vc6	430,94	28,1	4	3,182	44,71	10,37
vc7	589,64	39,9	4	3,182	63,48	10,77
vc8	478,78	30,0	4	3,182	47,73	9,97
vc9	416,57	16,1	4	3,182	25,62	6,15
vc10	341,09	20,2	4	3,182	32,14	9,42
vc11	414,04	27,2	4	3,182	43,28	10,45

ec (mm)	XY (-)	XY (moy)	XY (+)	XY (droite)
0,29	378,47	405,20	431,93	356,84
0,24	288,73	322,46	356,19	376,08
0,19	233,42	255,22	277,02	395,32
0,13	342,50	381,32	420,14	418,41
0,11	550,00	617,30	684,60	426,11
0,10	386,23	430,94	475,65	429,96
0,08	526,16	589,64	653,12	437,65
0,07	431,05	478,78	526,51	441,50
0,05	390,95	416,57	442,19	449,20
0,03	308,95	341,09	373,23	456,89
0,01	370,76	414,04	457,32	464,59



essai	N (tr/mn)	vf (m/mn)	Vc (m/s)
vc1	12000	9,0	8,61
vc2	11000	7,0	7,89
vc3	10000	5,0	7,17
vc4	9000	3,0	6,46
vc5	8800	2,6	6,31
vc6	8600	2,2	6,17
vc7	8400	1,8	6,03
vc8	8200	1,4	5,88
vc9	8000	1,0	5,74
vc10	7800	0,6	5,60
vc11	7600	0,2	5,45

Paramètres d'usinage constantes:

D = 14 mm Z = 1

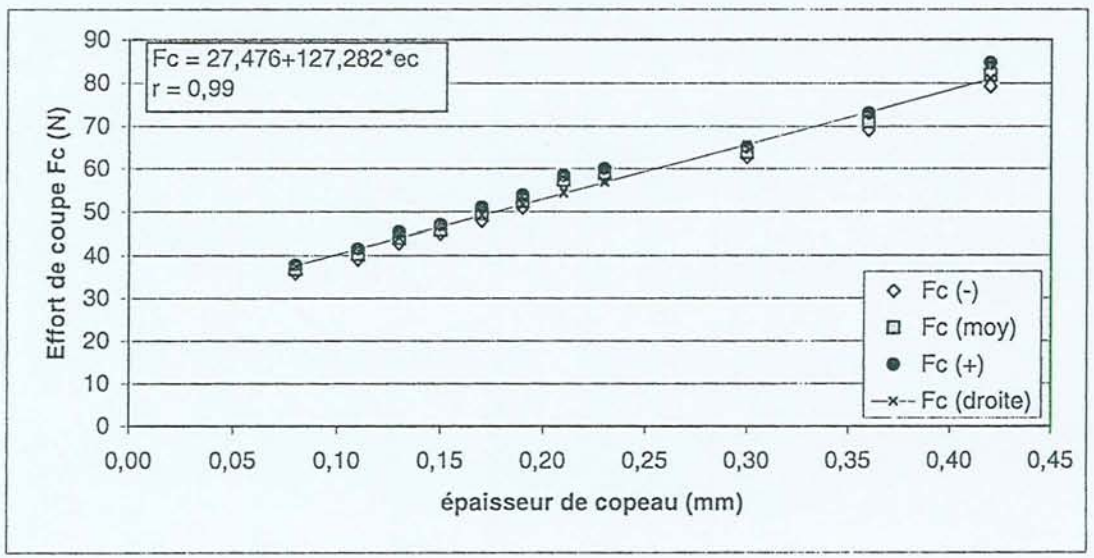
ap = 2,0 mm ae = 5,0 mm

E = t * écart type

Essais des efforts de coupe (N) :

essai	moyenne	écart type	n	t	E	erreur (%)
ec1	81,903	6,437	24	2,069	2,72	3,32
ec2	70,975	4,716	24	2,069	1,99	2,81
ec3	63,790	2,829	24	2,069	1,19	1,87
ec4	58,853	2,566	24	2,069	1,08	1,84
ec5	57,307	2,428	22	2,080	1,08	1,88
ec6	52,301	3,385	22	2,080	1,50	2,87
ec7	49,397	3,721	23	2,074	1,61	3,26
ec8	45,970	2,313	24	2,069	0,98	2,12
ec9	43,983	2,960	24	2,069	1,25	2,84
ec10	40,198	2,757	23	2,074	1,19	2,97
ec11	36,670	2,482	23	2,074	1,07	2,93

ec (mm)	Fc (-)	Fc (moy)	Fc (+)	Fc (droite)
0,42	79,184	81,903	84,622	80,93
0,36	68,983	70,975	72,967	73,30
0,30	62,595	63,790	64,985	65,66
0,23	57,769	58,853	59,937	56,75
0,21	56,230	57,307	58,384	54,21
0,19	50,800	52,301	53,802	51,66
0,17	47,788	49,397	51,006	49,11
0,15	44,993	45,970	46,947	46,57
0,13	42,733	43,983	45,233	44,02
0,11	39,006	40,198	41,390	41,48
0,08	35,597	36,670	37,743	37,66



essai	N (tr/mn)	vf (m/mn)	Vc (m/s)
ec1	9000	10,0	6,46
ec2	9000	8,5	6,46
ec3	9000	7,0	6,46
ec4	9000	5,5	6,46
ec5	9000	5,0	6,46
ec6	9000	4,5	6,46
ec7	9000	4,0	6,46
ec8	9000	3,5	6,46
ec9	9000	3,0	6,46
ec10	9000	2,5	6,46
ec11	9000	2,0	6,46

Paramètres d'usinage constantes:

D = 14 mm Z = 1

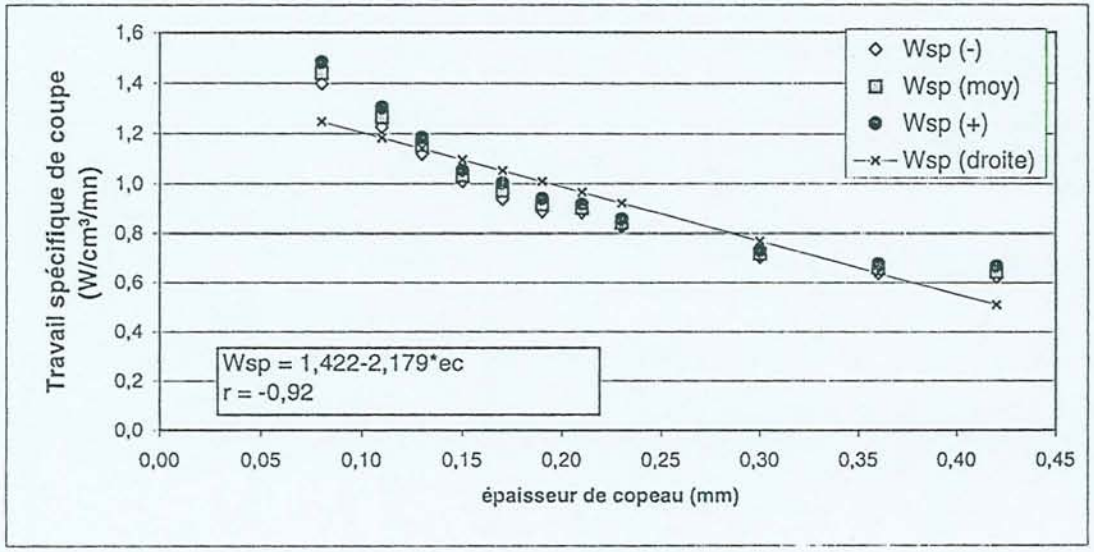
ap = 2,0 mm ae = 5,0 mm

E = t * écart type

Essais d'énergie de coupe (W/cm³/mn)

essai	moyenne	écart type	n	t	E	erreur (%)
ec1	0,643	0,051	24	2,069	0,02	3,35
ec2	0,656	0,044	24	2,069	0,02	2,83
ec3	0,716	0,032	24	2,069	0,01	1,89
ec4	0,840	0,037	24	2,069	0,02	1,86
ec5	0,900	0,038	22	2,080	0,02	1,87
ec6	0,913	0,059	22	2,080	0,03	2,87
ec7	0,970	0,073	23	2,074	0,03	3,25
ec8	1,031	0,052	24	2,069	0,02	2,13
ec9	1,151	0,077	24	2,069	0,03	2,83
ec10	1,263	0,087	23	2,074	0,04	2,98
ec11	1,440	0,097	23	2,074	0,04	2,91

ec (mm)	Wsp (-)	Wsp (moy)	Wsp (+)	Wsp (droite)
0,42	0,621	0,643	0,665	0,51
0,36	0,637	0,656	0,675	0,64
0,30	0,702	0,716	0,730	0,77
0,23	0,824	0,840	0,856	0,92
0,21	0,883	0,900	0,917	0,96
0,19	0,887	0,913	0,939	1,01
0,17	0,938	0,970	1,002	1,05
0,15	1,009	1,031	1,053	1,10
0,13	1,118	1,151	1,184	1,14
0,11	1,225	1,263	1,301	1,18
0,08	1,398	1,440	1,482	1,25



essai	N (tr/mn)	vf (m/mn)	Vc (m/s)
ec1	9000	10,0	6,46
ec2	9000	8,5	6,46
ec3	9000	7,0	6,46
ec4	9000	5,5	6,46
ec5	9000	5,0	6,46
ec6	9000	4,5	6,46
ec7	9000	4,0	6,46
ec8	9000	3,5	6,46
ec9	9000	3,0	6,46
ec10	9000	2,5	6,46
ec11	9000	2,0	6,46

Paramètres d'usinage constantes:

D = 14 mm Z = 1

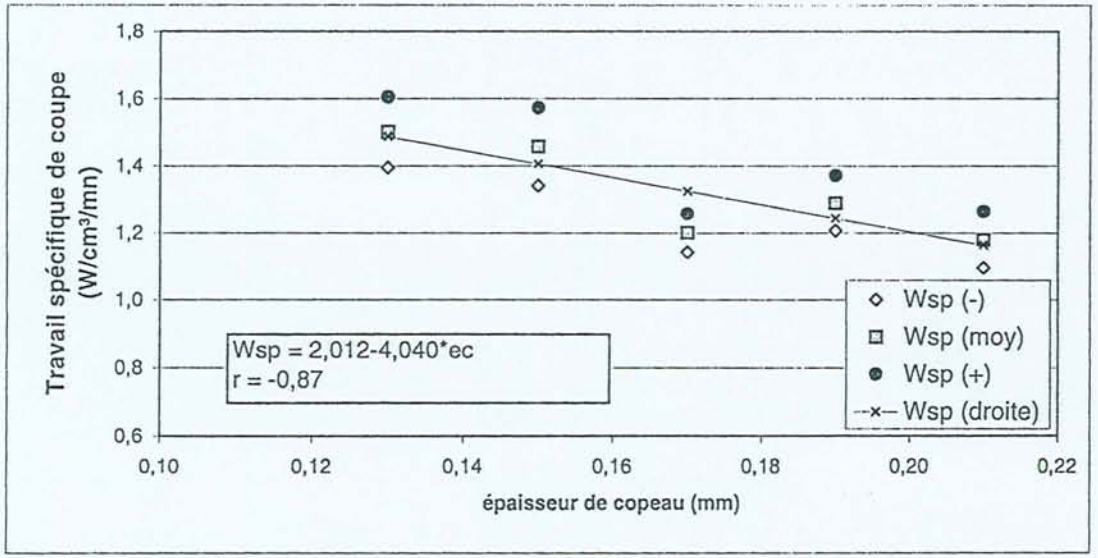
ap = 2,0 mm ae = 5,0 mm

E = t * écart type

Essais puissance de coupe (W)

essai	moyenne	écart type	n	t	E	erreur (%)
ec5	1,180	0,053	4	3,182	0,08	7,16
ec6	1,289	0,052	4	3,182	0,08	6,37
ec7	1,200	0,036	4	3,182	0,06	4,77
ec8	1,457	0,073	4	3,182	0,12	7,96
ec9	1,500	0,066	4	3,182	0,11	7,00

ec (mm)	Wsp (-)	Wsp (moy)	Wsp (+)	Wsp (droite)
0,21	1,096	1,180	1,264	1,16
0,19	1,207	1,289	1,371	1,24
0,17	1,143	1,200	1,257	1,33
0,15	1,341	1,457	1,573	1,41
0,13	1,395	1,500	1,605	1,49



essai	vf (m/mn)	Vc (m/s)
ec5	5,0	6,46
ec6	4,5	6,46
ec7	4,0	6,46
ec8	3,5	6,46
ec9	3,0	6,46

essai	Pv (W)	Pt (W)	Pc (W)
ec5	418	477	57
ec6	410	468	58
ec7	420	468	48
ec8	412	463	51
ec9	420	465	45

Paramètres d'usinage constantes:

D = 14 mm Z = 1

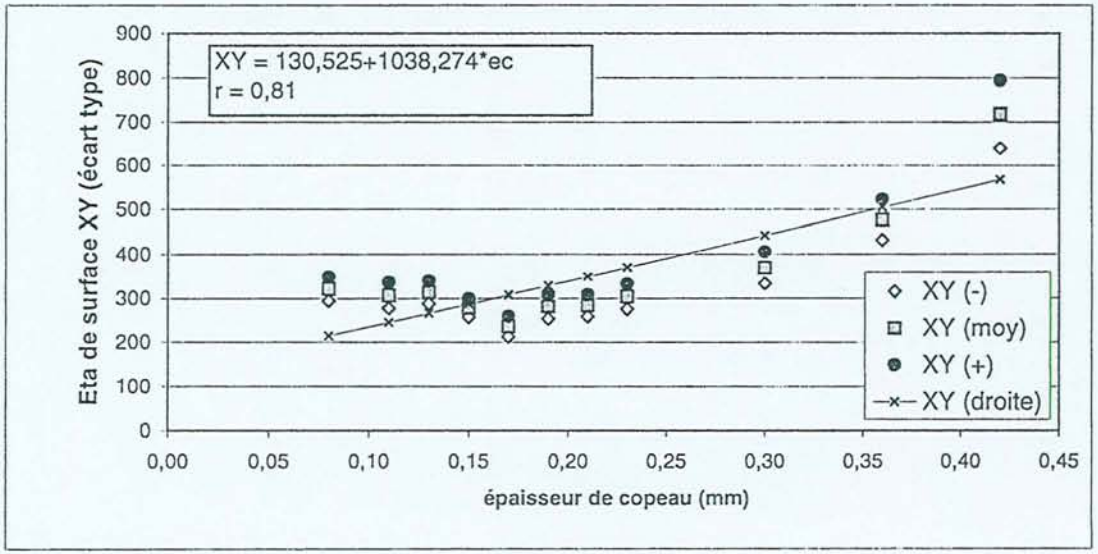
ap = 2,0 mm ae = 5,0 mm

E = t * écart type

Essais états de surface

essai	moyenne	écart type	n	t	E	erreur (%)
ec1	716,54	48,7	4	3,182	77,48	10,81
ec2	475,85	28,5	4	3,182	45,34	9,53
ec3	368,29	22,5	4	3,182	35,80	9,72
ec4	302,88	17,7	4	3,182	28,16	9,30
ec5	282,57	15,5	4	3,182	24,66	8,73
ec6	280,17	17,1	4	3,182	27,21	9,71
ec7	234,56	14,4	4	3,182	22,91	9,77
ec8	277,03	12,8	4	3,182	20,36	7,35
ec9	312,34	16,1	4	3,182	25,62	8,20
ec10	305,32	18,2	4	3,182	28,96	9,48
ec11	320,17	16,7	4	3,182	26,57	8,30

ec (mm)	XY (-)	XY (moy)	XY (+)	XY (droite)
0,42	639,06	716,54	794,02	566,60
0,36	430,51	475,85	521,19	504,30
0,30	332,49	368,29	404,09	442,01
0,23	274,72	302,88	331,04	369,33
0,21	257,91	282,57	307,23	348,56
0,19	252,96	280,17	307,38	327,80
0,17	211,65	234,56	257,47	307,03
0,15	256,67	277,03	297,39	286,27
0,13	286,72	312,34	337,96	265,50
0,11	276,36	305,32	334,28	244,74
0,08	293,60	320,17	346,74	213,59



essai	N (tr/mn)	vf (m/mn)	Vc (m/s)
ec1	9000	10,0	6,46
ec2	9000	8,5	6,46
ec3	9000	7,0	6,46
ec4	9000	5,5	6,46
ec5	9000	5,0	6,46
ec6	9000	4,5	6,46
ec7	9000	4,0	6,46
ec8	9000	3,5	6,46
ec9	9000	3,0	6,46
ec10	9000	2,5	6,46
ec11	9000	2,0	6,46

Paramètres d'usinage constantes:

D = 14 mm Z = 1

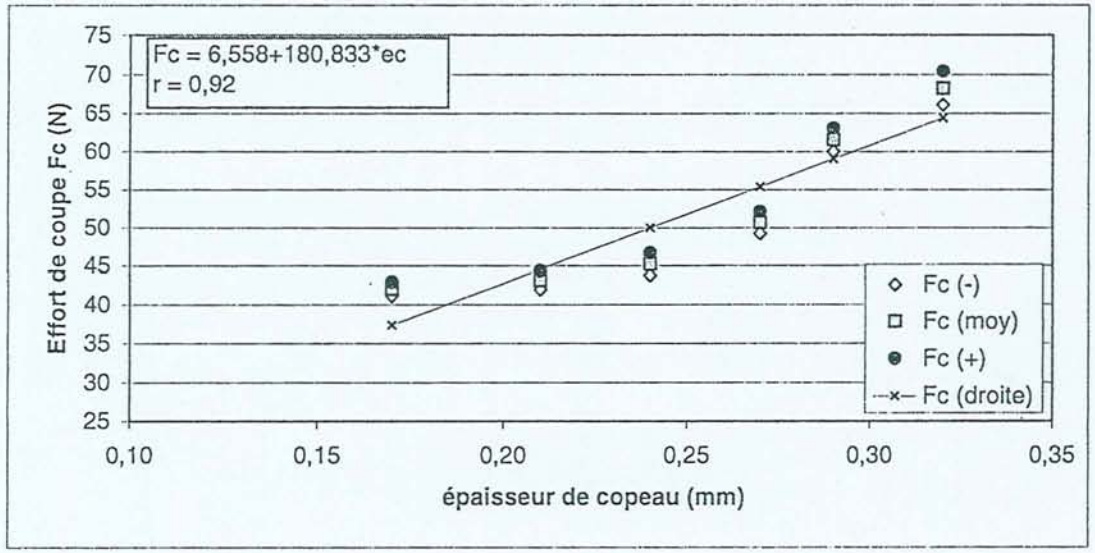
ap = 2,0 mm ae = 5,0 mm

E = t * écart type

Essais des efforts de coupe (N) :

essai	moyenne	écart type	n	t	E	erreur (%)
ad1	41,97	2,13	24	2,069	0,90	2,14
ad2	43,10	2,72	23	2,074	1,18	2,73
ad3	45,19	3,43	24	2,069	1,45	3,21
ad4	50,65	3,43	24	2,069	1,45	2,86
ad5	61,51	3,53	23	2,074	1,53	2,48
ad6	68,18	5,04	24	2,069	2,13	3,12

ec (mm)	Fc (-)	Fc (moy)	Fc (+)	Fc (droite)
0,17	41,070	41,970	42,870	37,30
0,21	41,924	43,100	44,276	44,53
0,24	43,741	45,190	46,639	49,96
0,27	49,201	50,650	52,099	55,38
0,29	59,983	61,510	63,037	59,00
0,32	66,051	68,180	70,309	64,42



essai	ap (mm)	vf (m/mn)	Vc (m/s)
ad1	2,0	4,0	6,46
ad2	3,0	4,0	6,46
ad3	4,0	4,0	6,46
ad4	5,0	4,0	6,46
ad5	6,0	4,0	6,46
ad6	7,0	4,0	6,46

Paramètres d'usinage constantes:

D = 14 mm Z = 1

fz = 0,44 mm ae = 5,0 mm

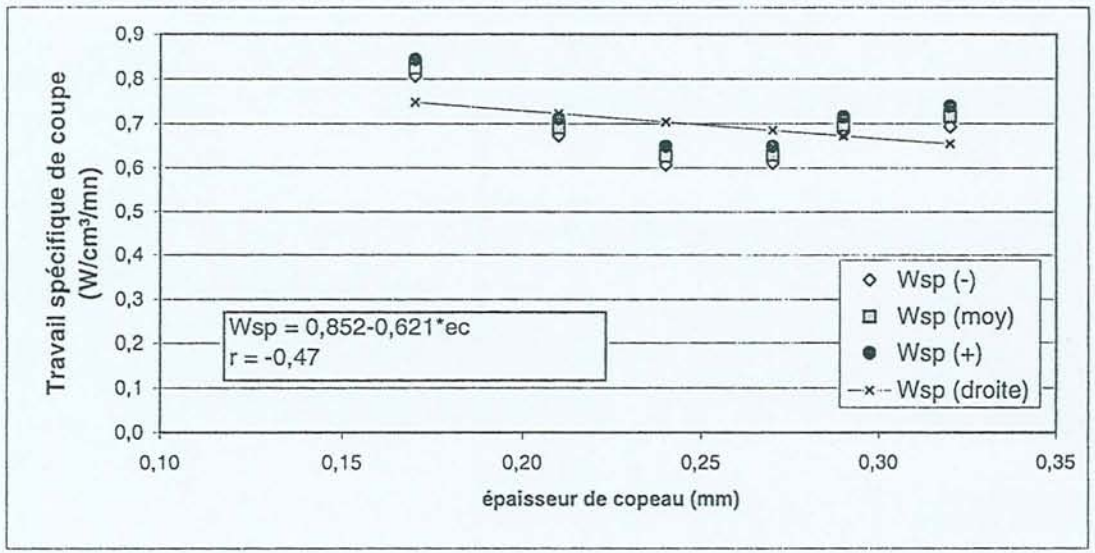
N = 9000 tr/mn

E = t * écart type

Essais d'énergie de coupe (W/cm³/mn)

essai	moyenne	écart type	n	t	E	erreur (%)
ad1	0,824	0,042	24	2,069	0,02	2,15
ad2	0,691	0,044	23	2,074	0,02	2,75
ad3	0,627	0,048	24	2,069	0,02	3,23
ad4	0,629	0,043	24	2,069	0,02	2,89
ad5	0,697	0,040	23	2,074	0,02	2,48
ad6	0,715	0,053	24	2,069	0,02	3,13

ec (mm)	Wsp (-)	Wsp (moy)	Wsp (+)	Wsp (droite)
0,17	0,806	0,824	0,842	0,75
0,21	0,672	0,691	0,710	0,72
0,24	0,607	0,627	0,647	0,70
0,27	0,611	0,629	0,647	0,68
0,29	0,680	0,697	0,714	0,67
0,32	0,693	0,715	0,737	0,65



essai	ap (mm)	vf (m/mn)	Vc (m/s)
ad1	2,0	4,0	6,46
ad2	3,0	4,0	6,46
ad3	4,0	4,0	6,46
ad4	5,0	4,0	6,46
ad5	6,0	4,0	6,46
ad6	7,0	4,0	6,46

Paramètres d'usinage constantes:

D = 14 mm Z = 1

fz = 0,44 mm ae = 5,0 mm

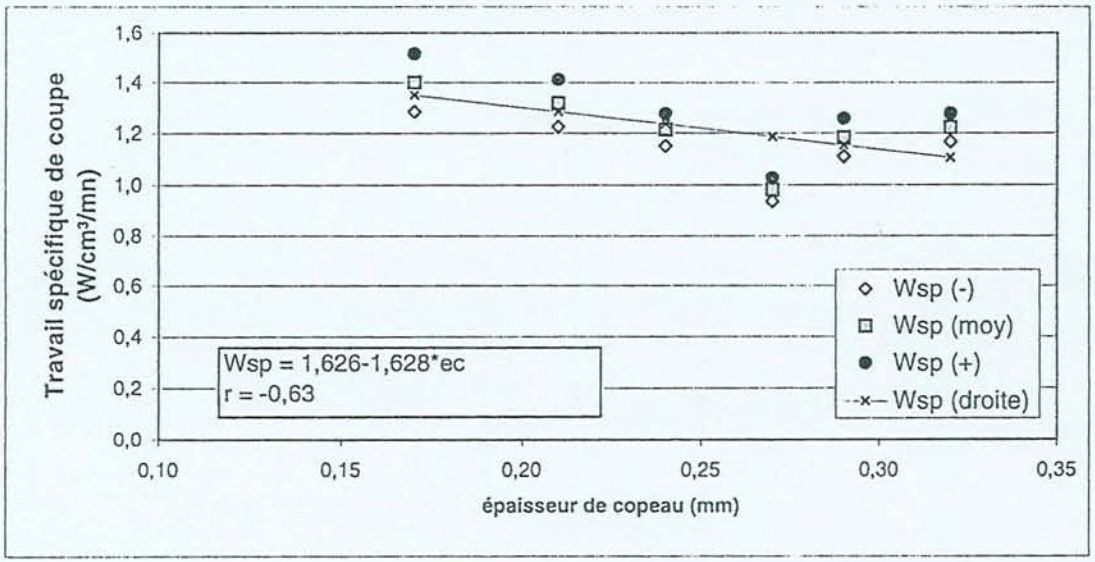
N = 9000 tr/mn

E = t * écart type

Essais puissance de coupe (W)

essai	moyenne	écart type	n	t	E	erreur (%)
ad1	1,400	0,073	4	3,182	0,12	8,27
ad2	1,317	0,058	4	3,182	0,09	6,99
ad3	1,213	0,039	4	3,182	0,06	5,09
ad4	0,980	0,028	4	3,182	0,05	4,61
ad5	1,183	0,046	4	3,182	0,07	6,20
ad6	1,221	0,034	4	3,182	0,05	4,46

ec (mm)	Wsp (-)	Wsp (moy)	Wsp (+)	Wsp (droite)
0,17	1,284	1,400	1,516	1,35
0,21	1,225	1,317	1,409	1,28
0,24	1,151	1,213	1,275	1,24
0,27	0,935	0,980	1,025	1,19
0,29	1,110	1,183	1,256	1,15
0,32	1,167	1,221	1,275	1,11



essai	vf (m/mn)	Vc (m/s)	ap (mm)
ad1	4,0	6,46	2,0
ad2	4,0	6,46	3,0
ad3	4,0	6,46	4,0
ad4	4,0	6,46	5,0
ad5	4,0	6,46	6,0
ad6	4,0	6,46	7,0

essai	Pv (W)	Pt (W)	Pc (W)
ad1	431	487	56
ad2	432	511	79
ad3	430	527	97
ad4	420	518	98
ad5	414	556	142
ad6	414	585	171

Paramètres d'usinage constantes:

D = 14 mm Z = 1

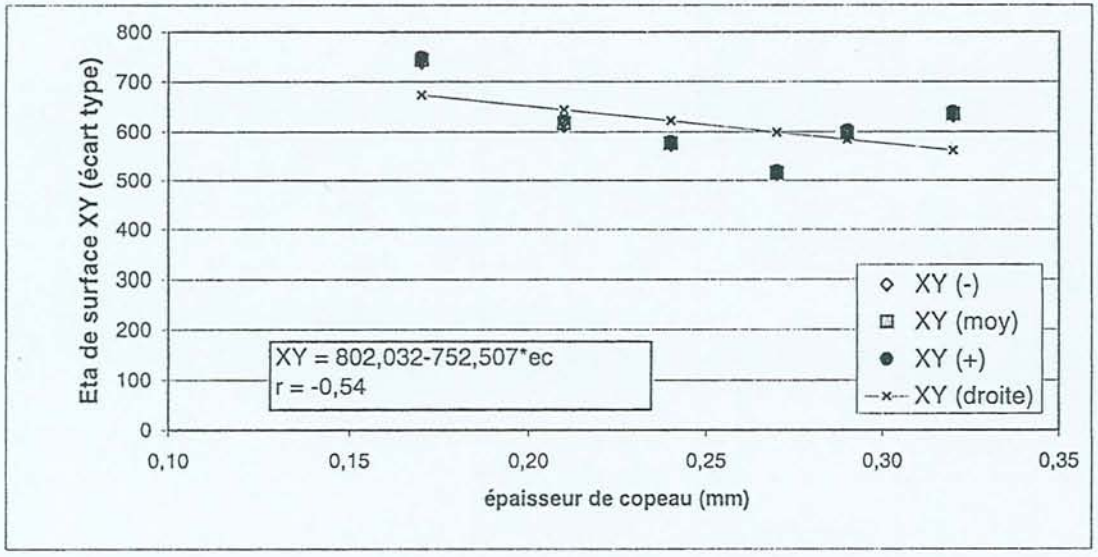
fz = 0,44 mm ae = 5,0 mm

N = 9000 tr/mn E = t * écart type

Essais états de surface

essai	moyenne	écart type	n	t	E	erreur (%)
ad1	743,74	3,57	4	3,182	5,68	0,76
ad2	616,80	3,21	4	3,182	5,11	0,83
ad3	575,72	2,13	4	3,182	3,39	0,59
ad4	515,25	2,16	4	3,182	3,44	0,67
ad5	596,62	3,58	4	3,182	5,70	0,95
ad6	635,30	2,80	4	3,182	4,45	0,70

ec (mm)	XY (-)	XY (moy)	XY (+)	XY (droite)
0,17	738,06	743,74	749,42	674,11
0,21	611,69	616,80	621,91	644,01
0,24	572,33	575,72	579,11	621,43
0,27	511,81	515,25	518,69	598,85
0,29	590,92	596,62	602,32	583,80
0,32	630,85	635,30	639,75	561,23



essai	ap (mm)	vf (m/mn)	Vc (m/s)
ad1	2,0	4,0	6,46
ad2	3,0	4,0	6,46
ad3	4,0	4,0	6,46
ad4	5,0	4,0	6,46
ad5	6,0	4,0	6,46
ad6	7,0	4,0	6,46

Paramètres d'usinage constantes:

D = 14 mm Z = 1

fz = 0,44 mm ae = 5,0 mm

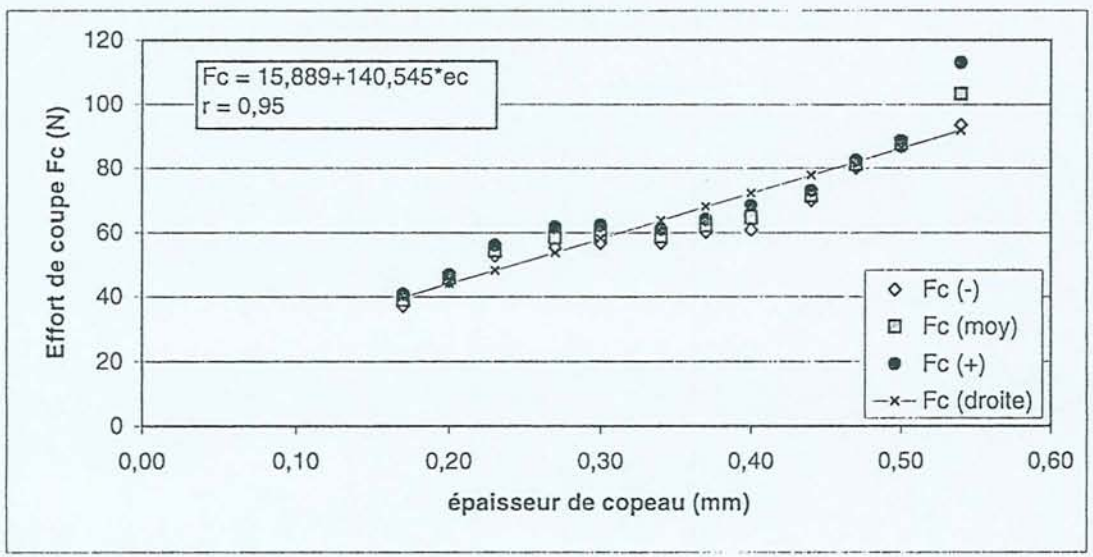
N = 9000 tr/mn

E = t * écart type

Essais des efforts de coupe (N) :

essai	moyenne	écart type	n	t	E	erreur (%)
q1	38,84	2,61	10	2,262	1,87	4,81
q2	45,71	1,62	12	2,201	1,03	2,25
q3	54,37	2,48	11	2,228	1,67	3,06
q4	58,38	5,01	12	2,201	3,18	5,45
q5	59,40	4,21	12	2,201	2,67	4,50
q6	58,76	3,24	12	2,201	2,06	3,50
q7	62,03	3,09	12	2,201	1,96	3,17
q8	64,45	5,56	11	2,228	3,74	5,80
q9	71,34	2,37	12	2,201	1,51	2,11
q10	81,14	1,64	10	2,262	1,17	1,45
q11	87,55	1,27	10	2,262	0,91	1,04
q12	103,21	15,39	12	2,201	9,78	9,47

ec (mm)	Fc (-)	Fc (moy)	Fc (+)	Fc (droite)
0,17	36,973	38,840	40,707	39,78
0,20	44,681	45,710	46,739	44,00
0,23	52,704	54,370	56,036	48,21
0,27	55,197	58,380	61,563	53,84
0,30	56,725	59,400	62,075	58,05
0,34	56,701	58,760	60,819	63,67
0,37	60,067	62,030	63,993	67,89
0,40	60,715	64,450	68,185	72,11
0,44	69,834	71,340	72,846	77,73
0,47	79,967	81,140	82,313	81,95
0,50	86,642	87,550	88,458	86,16
0,54	93,432	103,210	112,988	91,78



essai	fz (mm)	vf (m/mn)	Vc (m/s)
ec1	0,28	2,5	6,46
ec2	0,33	3,0	6,46
ec3	0,39	3,5	6,46
ec4	0,44	4,0	6,46
ec5	0,50	4,5	6,46
ec6	0,56	5,0	6,46
ec7	0,61	5,5	6,46
ec8	0,67	6,0	6,46
ec9	0,72	6,5	6,46
ec10	0,78	7,0	6,46
ec11	0,83	7,5	6,46
ec12	0,89	8,0	6,46

Paramètres d'usinage constantes:

D = 14 mm Z = 1

ap = 5,0 mm ae = 5,0 mm

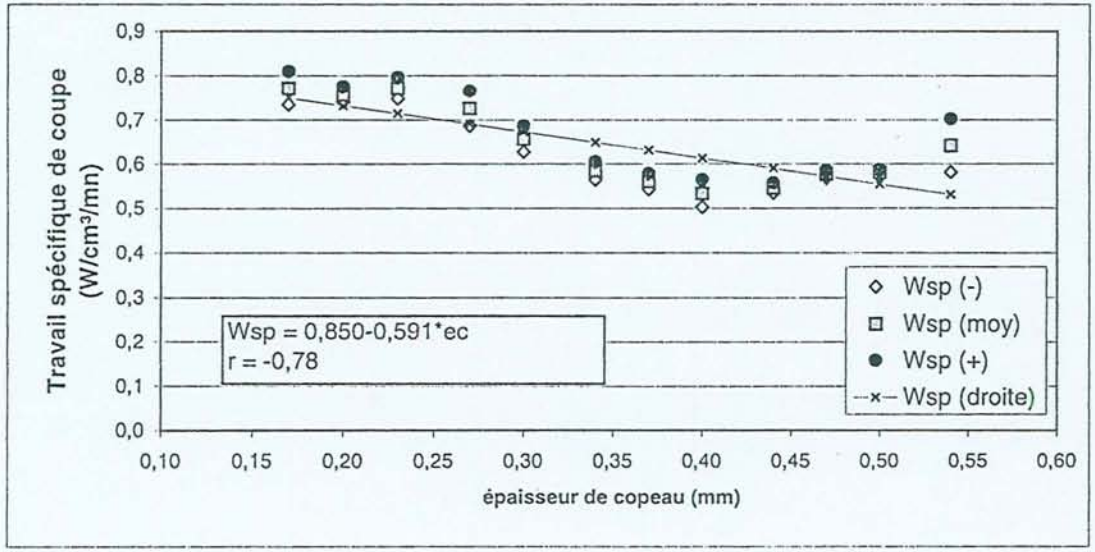
N = 9000 tr/mn

E = t * écart type

Essais d'énergie de coupe (W/cm³/mn)

essai	moyenne	écart type	n	t	E	erreur (%)
q1	0,771	0,052	10	2,262	0,04	4,82
q2	0,757	0,027	12	2,201	0,02	2,27
q3	0,771	0,035	11	2,228	0,02	3,05
q4	0,725	0,062	12	2,201	0,04	5,43
q5	0,656	0,046	12	2,201	0,03	4,46
q6	0,584	0,032	12	2,201	0,02	3,48
q7	0,560	0,028	12	2,201	0,02	3,18
q8	0,533	0,046	11	2,228	0,03	5,80
q9	0,545	0,018	12	2,201	0,01	2,10
q10	0,576	0,012	10	2,262	0,01	1,49
q11	0,580	0,008	10	2,262	0,01	0,99
q12	0,641	0,095	12	2,201	0,06	9,42

ec (mm)	Wsp (-)	Wsp (moy)	Wsp (+)	Wsp (droite)
0,17	0,734	0,771	0,808	0,75
0,20	0,740	0,757	0,774	0,73
0,23	0,747	0,771	0,795	0,71
0,27	0,686	0,725	0,764	0,69
0,30	0,627	0,656	0,685	0,67
0,34	0,564	0,584	0,604	0,65
0,37	0,542	0,560	0,578	0,63
0,40	0,502	0,533	0,564	0,61
0,44	0,534	0,545	0,556	0,59
0,47	0,567	0,576	0,585	0,57
0,50	0,574	0,580	0,586	0,55
0,54	0,581	0,641	0,701	0,53



essai	fz (mm)	vf (m/mn)	Vc (m/s)
ec1	0,28	2,5	6,46
ec2	0,33	3,0	6,46
ec3	0,39	3,5	6,46
ec4	0,44	4,0	6,46
ec5	0,50	4,5	6,46
ec6	0,56	5,0	6,46
ec7	0,61	5,5	6,46
ec8	0,67	6,0	6,46
ec9	0,72	6,5	6,46
ec10	0,78	7,0	6,46
ec11	0,83	7,5	6,46
ec12	0,89	8,0	6,46

Paramètres d'usinage constantes:

D = 14 mm Z = 1

ap = 5,0 mm ae = 5,0 mm

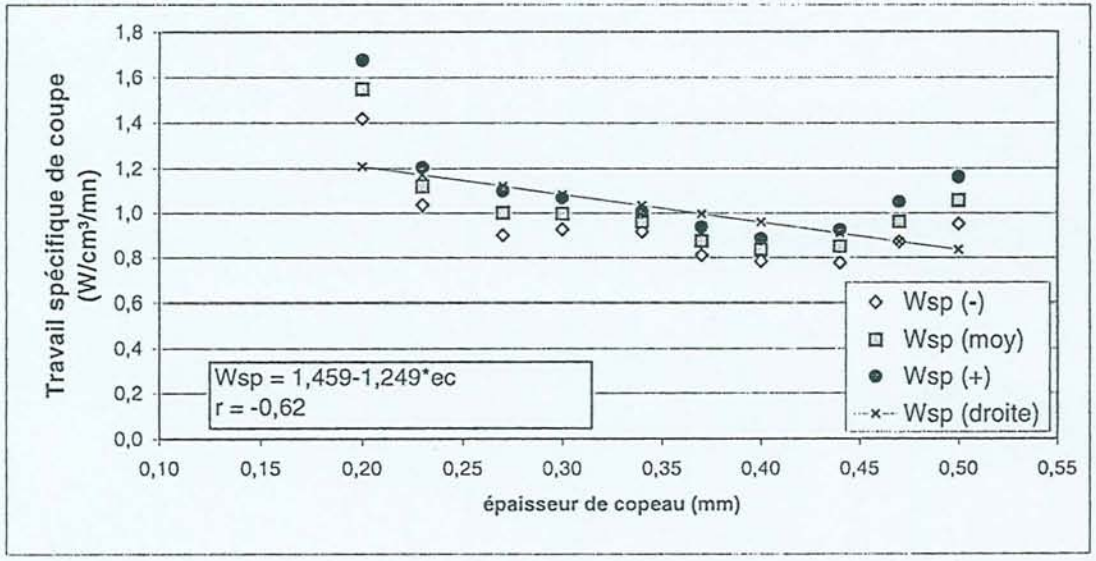
N = 9000 tr/mn

E = t * écart type

Essais puissance de coupe (W)

essai	moyenne	écart type	n	t	E	erreur (%)
q2	1,547	0,080	4	3,182	0,13	8,27
q3	1,120	0,053	4	3,182	0,08	7,47
q4	1,000	0,062	4	3,182	0,10	9,86
q5	0,996	0,044	4	3,182	0,07	7,00
q6	0,960	0,028	4	3,182	0,04	4,61
q7	0,873	0,040	4	3,182	0,06	7,33
q8	0,833	0,032	4	3,182	0,05	6,05
q9	0,849	0,047	4	3,182	0,07	8,75
q10	0,960	0,056	4	3,182	0,09	9,28
q11	1,056	0,066	4	3,182	0,11	9,94

ec (mm)	Wsp (-)	Wsp (moy)	Wsp (+)	Wsp (droite)
0,20	1,419	1,547	1,675	1,21
0,23	1,036	1,120	1,204	1,17
0,27	0,901	1,000	1,099	1,12
0,30	0,926	0,996	1,066	1,08
0,34	0,916	0,960	1,004	1,03
0,37	0,809	0,873	0,937	1,00
0,40	0,783	0,833	0,883	0,96
0,44	0,775	0,849	0,923	0,91
0,47	0,871	0,960	1,049	0,87
0,50	0,951	1,056	1,161	0,83



essai	vf (m/mn)	essai	vf (m/mn)
q2	3,0	q7	5,5
q3	3,5	q8	6,0
q4	4,0	q9	6,5
q5	4,5	q10	7,0
q6	5,0	q11	7,5

essai	Pv (W)	Pt (W)	Pc (W)
q2	412	528	116
q3	412	510	98
q4	412	512	100
q5	412	524	112
q6	412	532	120
q7	412	532	120
q8	412	537	125
q9	412	550	138
q10	412	580	168
q11	412	610	198

Paramètres d'usinage constantes:

D = 14 mm Z = 1

ap = 5,0 mm ae = 5,0 mm

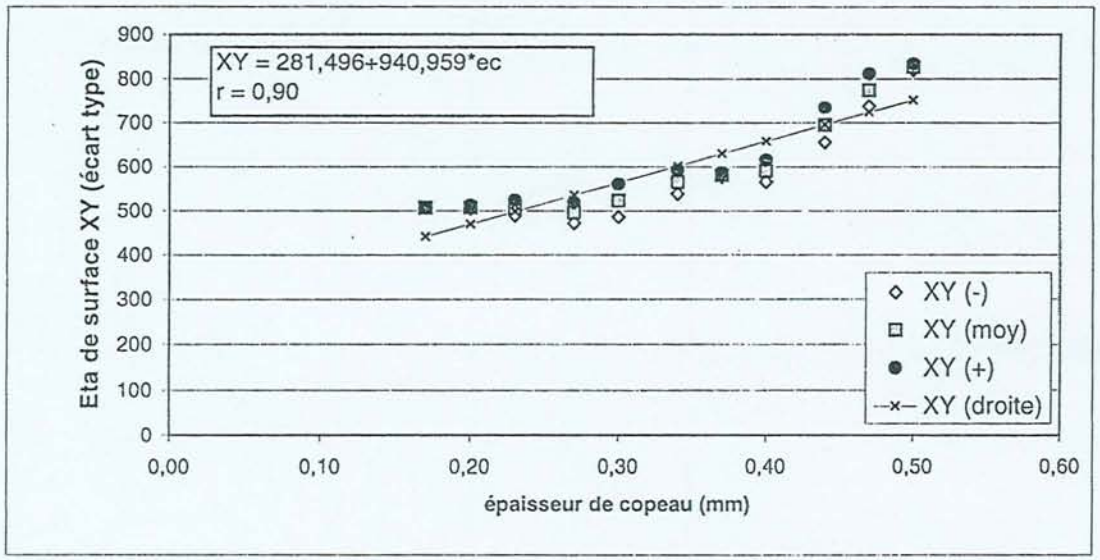
N = 9000 tr/mn Vc = 6,46

E = t * écart type

Essais états de surface

essai	moyenne	écart type	n	t	E	erreur (%)
q1	506,8	0,033	4	3,182	0,05	0,01
q2	507,0	2,890	4	3,182	4,60	0,91
q3	506,2	10,805	4	3,182	17,19	3,40
q4	495,2	14,762	4	3,182	23,49	4,74
q5	523,0	23,282	4	3,182	37,04	7,08
q6	565,0	16,779	4	3,182	26,70	4,72
q7	580,6	3,179	4	3,182	5,06	0,87
q8	590,1	15,670	4	3,182	24,93	4,22
q9	694,3	24,650	4	3,182	39,22	5,65
q10	773,8	22,682	4	3,182	36,09	4,66
q11	826,6	4,873	4	3,182	7,75	0,94

ec (mm)	XY (-)	XY (moy)	XY (+)	XY (droite)
0,17	506,75	506,80	506,85	441,46
0,20	502,40	507,00	511,60	469,69
0,23	489,01	506,20	523,39	497,92
0,27	471,71	495,20	518,69	535,56
0,30	485,96	523,00	560,04	563,78
0,34	538,30	565,00	591,70	601,42
0,37	575,54	580,60	585,66	629,65
0,40	565,17	590,10	615,03	657,88
0,44	655,08	694,30	733,52	695,52
0,47	737,71	773,80	809,89	723,75
0,50	818,85	826,60	834,35	751,98



essai	fz (mm)	vf (m/mn)	Vc (m/s)
ec1	0,28	2,5	6,46
ec2	0,33	3,0	6,46
ec3	0,39	3,5	6,46
ec4	0,44	4,0	6,46
ec5	0,50	4,5	6,46
ec6	0,56	5,0	6,46
ec7	0,61	5,5	6,46
ec8	0,67	6,0	6,46
ec9	0,72	6,5	6,46
ec10	0,78	7,0	6,46
ec11	0,83	7,5	6,46

Paramètres d'usinage constantes:

D = 14 mm Z = 1

ap = 5,0 mm ae = 5,0 mm

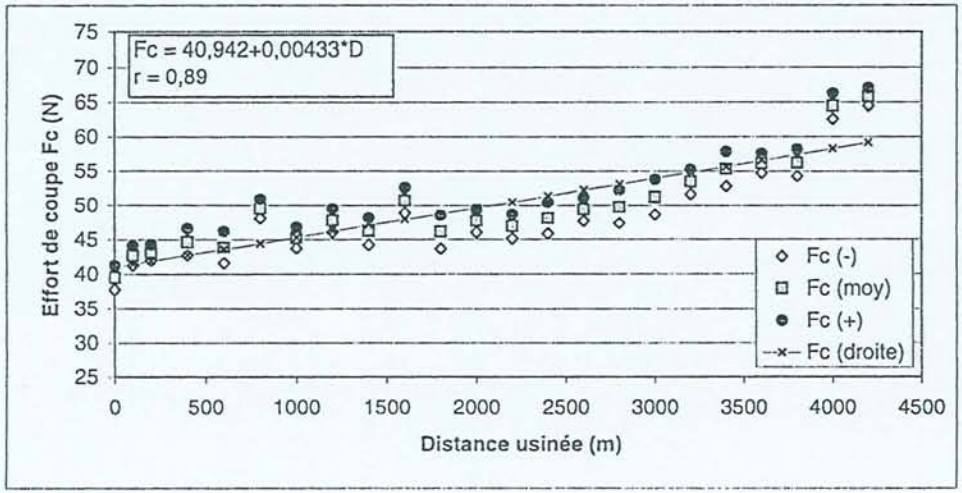
N = 9000 tr/mn

E = t * écart type

Essais des efforts de coupe Fc(N) :

essai	moyenne	écart type	n	t	E	erreur (%)
us0	39,43	3,98	24	2,069	1,68	4,26
us100	42,60	3,24	23	2,074	1,40	3,29
us200	43,04	2,77	24	2,069	1,17	2,72
us400	44,57	4,55	24	2,069	1,92	4,31
us600	43,79	5,40	24	2,069	2,28	5,21
us800	49,44	3,44	24	2,069	1,45	2,94
us1000	45,18	3,49	24	2,069	1,47	3,26
us1200	47,70	4,12	24	2,069	1,74	3,65
us1400	46,13	4,59	24	2,069	1,94	4,20
us1600	50,66	4,34	24	2,069	1,83	3,62
us1800	46,05	5,66	24	2,069	2,39	5,19
us2000	47,64	3,97	24	2,069	1,68	3,52
us2200	46,86	4,16	24	2,069	1,76	3,75
us2400	48,06	5,42	24	2,069	2,29	4,76
us2600	49,33	3,99	24	2,069	1,69	3,42
us2800	49,72	5,71	24	2,069	2,41	4,85
us3000	51,15	6,03	24	2,069	2,55	4,98
us3200	53,39	4,26	24	2,069	1,80	3,37
us3400	55,27	5,81	23	2,074	2,51	4,55
us3600	56,10	3,29	23	2,074	1,42	2,54
us3800	56,16	4,62	24	2,069	1,95	3,47
us4000	64,36	4,38	24	2,069	1,85	2,87
us4200	65,71	2,99	24	2,069	1,26	1,92

distance (m)	Fc (-)	Fc (moy)	Fc (+)	Fc (droite)
0	37,749	39,430	41,111	40,94
100	41,199	42,600	44,001	41,38
200	41,870	43,040	44,210	41,81
400	42,648	44,570	46,492	42,68
600	41,509	43,790	46,071	43,54
800	47,987	49,440	50,893	44,41
1000	43,706	45,180	46,654	45,28
1200	45,960	47,700	49,440	46,14
1400	44,191	46,130	48,069	47,01
1600	48,827	50,660	52,493	47,88
1800	43,660	46,050	48,440	48,74
2000	45,963	47,640	49,317	49,61
2200	45,103	46,860	48,617	50,48
2400	45,771	48,060	50,349	51,34
2600	47,645	49,330	51,015	52,21
2800	47,308	49,720	52,132	53,08
3000	48,603	51,150	53,697	53,94
3200	51,591	53,390	55,189	54,81
3400	52,757	55,270	57,783	55,68
3600	54,677	56,100	57,523	56,54
3800	54,209	56,160	58,111	57,41
4000	62,510	64,360	66,210	58,28
4200	64,447	65,710	66,973	59,15



Paramètres d'usinage constantes:

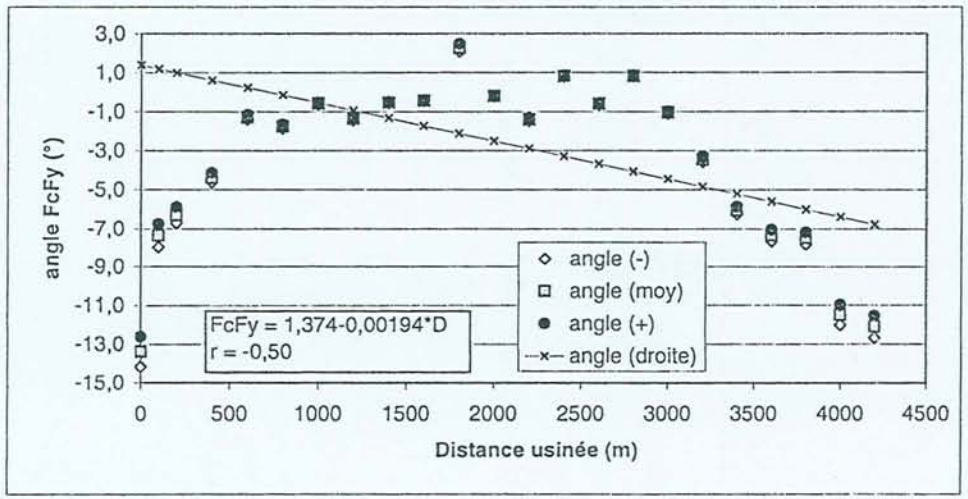
D =	14	mm
Z =	1	
ap =	2,0	mm
ae =	5,0	mm
vf =	4,0	m/mn
Vc =	6,46	m/s
N =	9000	tr/mn
fz =	0,44	mm
ec =	0,17	mm
Ad =	10	mm²
Q =	40	cm³/mn

E = t * écart type

L'angle FcFy

essai	Fx (N)	Fy (N)	angle °	écart type	n	t	E	erreur (%)
us0	-9,13	38,36	-13,39	1,82	24	2,069	0,77	-5,74
us100	-5,47	42,25	-7,38	1,41	23	2,074	0,61	-8,26
us200	-4,73	42,78	-6,31	0,97	24	2,069	0,41	-6,49
us400	-3,41	44,44	-4,39	0,57	24	2,069	0,24	-5,48
us600	-1,00	43,78	-1,31	0,28	24	2,069	0,12	-9,03
us800	-1,54	49,42	-1,78	0,26	24	2,069	0,11	-6,17
us1000	-0,48	45,18	-0,61	0,07	24	2,069	0,03	-4,85
us1200	-1,14	47,69	-1,37	0,22	24	2,069	0,09	-6,78
us1400	-0,46	46,13	-0,57	0,08	24	2,069	0,03	-5,93
us1600	-0,42	50,66	-0,48	0,06	24	2,069	0,03	-5,28
us1800	1,82	46,01	2,27	0,47	24	2,069	0,20	8,74
us2000	-0,20	47,64	-0,24	0,05	24	2,069	0,02	-8,80
us2200	-1,17	46,85	-1,43	0,15	24	2,069	0,06	-4,43
us2400	0,67	48,06	0,80	0,07	24	2,069	0,03	3,70
us2600	-0,54	49,33	-0,63	0,05	24	2,069	0,02	-3,35
us2800	0,69	49,72	0,80	0,06	24	2,069	0,03	3,17
us3000	-0,96	51,14	-1,08	0,11	24	2,069	0,05	-4,30
us3200	-3,22	53,29	-3,46	0,33	24	2,069	0,14	-4,03
us3400	-5,84	54,96	-6,07	0,45	23	2,074	0,19	-3,21
us3600	-7,20	55,64	-7,37	0,68	23	2,074	0,29	-3,99
us3800	-7,35	55,68	-7,52	0,74	24	2,069	0,31	-4,16
us4000	-12,83	63,07	-11,50	1,21	24	2,069	0,51	-4,44
us4200	-13,78	64,25	-12,11	1,33	24	2,069	0,56	-4,64

distance (m)	angle (-)	angle (moy)	angle (+)	angle (droite)
0	-14,159	-13,390	-12,621	1,37
100	-7,990	-7,380	-6,770	1,18
200	-6,720	-6,310	-5,900	0,99
400	-4,631	-4,390	-4,149	0,60
600	-1,428	-1,310	-1,192	0,21
800	-1,890	-1,780	-1,670	-0,18
1000	-0,640	-0,610	-0,580	-0,57
1200	-1,463	-1,370	-1,277	-0,96
1400	-0,604	-0,570	-0,536	-1,35
1600	-0,505	-0,480	-0,455	-1,73
1800	2,072	2,270	2,468	-2,12
2000	-0,261	-0,240	-0,219	-2,51
2200	-1,493	-1,430	-1,367	-2,90
2400	0,770	0,800	0,830	-3,29
2600	-0,651	-0,630	-0,609	-3,68
2800	0,775	0,800	0,825	-4,07
3000	-1,126	-1,080	-1,034	-4,45
3200	-3,599	-3,460	-3,321	-4,84
3400	-6,265	-6,070	-5,875	-5,23
3600	-7,664	-7,370	-7,076	-5,62
3800	-7,833	-7,520	-7,207	-6,01
4000	-12,011	-11,500	-10,989	-6,40
4200	-12,672	-12,110	-11,548	-6,79



Paramètres d'usinage constantes:

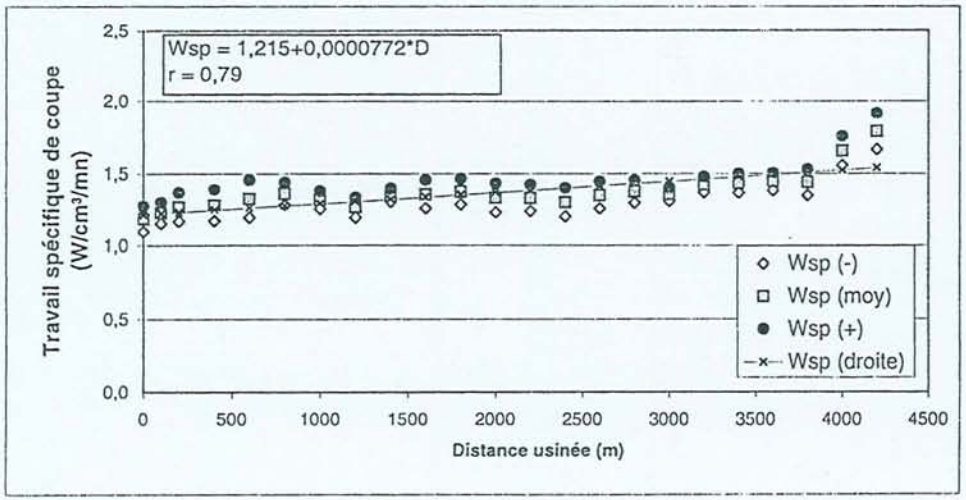
D = *	14	mm
Z =	1	
ap =	2,0	mm
ae =	5,0	mm
vf =	4,0	m/mn
Vc =	6,46	m/s
N =	9000	tr/mn
fz =	0,44	mm
ec =	0,17	mm
Ad =	10	mm²
Q =	40	cm³/mn

E = t * écart type

Essais d'énergie de coupe (W/cm³/mn)

essai	Pc (W)	Wsp	écart type	n	t	E	erreur (%)
us0	47,33	1,183	0,055	4	3,182	0,09	7,40
us100	49,00	1,225	0,046	4	3,182	0,07	5,97
us200	50,67	1,267	0,062	4	3,182	0,10	7,79
us400	51,20	1,280	0,068	4	3,182	0,11	8,45
us600	53,00	1,325	0,081	4	3,182	0,13	9,73
us800	54,40	1,360	0,049	4	3,182	0,08	5,73
us1000	52,67	1,317	0,039	4	3,182	0,06	4,71
us1200	50,60	1,265	0,044	4	3,182	0,07	5,53
us1400	54,00	1,350	0,029	4	3,182	0,05	3,42
us1600	54,25	1,356	0,060	4	3,182	0,10	7,04
us1800	55,00	1,375	0,055	4	3,182	0,09	6,36
us2000	53,25	1,331	0,063	4	3,182	0,10	7,53
us2200	53,20	1,330	0,057	4	3,182	0,09	6,82
us2400	52,00	1,300	0,062	4	3,182	0,10	7,59
us2600	54,00	1,350	0,058	4	3,182	0,09	6,84
us2800	55,00	1,375	0,048	4	3,182	0,08	5,55
us3000	54,25	1,356	0,029	4	3,182	0,05	3,40
us3200	56,90	1,423	0,033	4	3,182	0,05	3,69
us3400	57,30	1,433	0,041	4	3,182	0,07	4,55
us3600	57,70	1,443	0,037	4	3,182	0,06	4,08
us3800	57,50	1,438	0,055	4	3,182	0,09	6,09
us4000	66,20	1,655	0,062	4	3,182	0,10	5,96
us4200	71,50	1,788	0,077	4	3,182	0,12	6,85

distance (m)	Wsp (-)	Wsp (moy)	Wsp (+)	Wsp (droite)
0	1,095	1,183	1,271	1,215
100	1,152	1,225	1,298	1,223
200	1,168	1,267	1,366	1,231
400	1,172	1,280	1,388	1,246
600	1,196	1,325	1,454	1,262
800	1,282	1,360	1,438	1,277
1000	1,255	1,317	1,379	1,292
1200	1,195	1,265	1,335	1,308
1400	1,304	1,350	1,396	1,323
1600	1,261	1,356	1,451	1,339
1800	1,287	1,375	1,463	1,354
2000	1,231	1,331	1,431	1,370
2200	1,239	1,330	1,421	1,385
2400	1,201	1,300	1,399	1,401
2600	1,258	1,350	1,442	1,416
2800	1,299	1,375	1,451	1,431
3000	1,310	1,356	1,402	1,447
3200	1,370	1,423	1,476	1,462
3400	1,368	1,433	1,498	1,478
3600	1,384	1,443	1,502	1,493
3800	1,350	1,438	1,526	1,509
4000	1,556	1,655	1,754	1,524
4200	1,665	1,788	1,911	1,539



Paramètres d'usinage constantes:

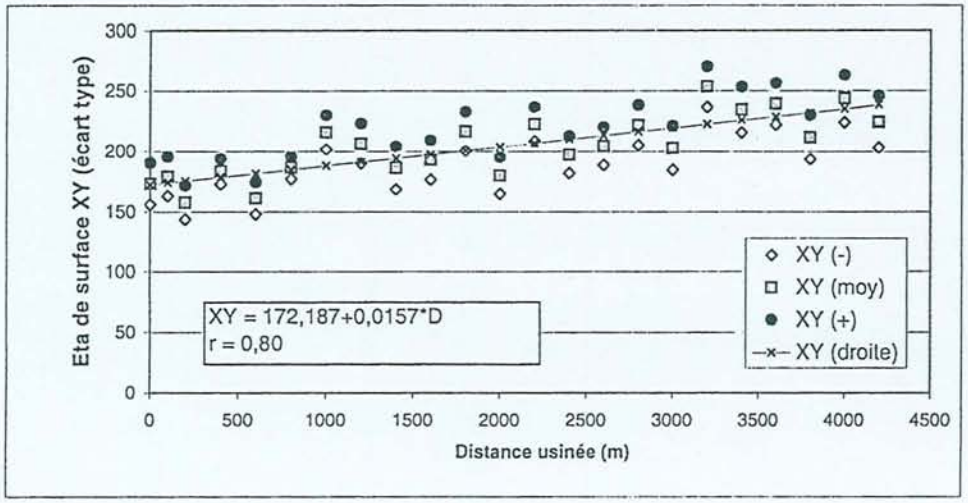
D =	14	mm
Z =	1	
ap =	2,0	mm
ae =	5,0	mm
vf =	4,0	m/mn
Vc =	6,46	m/s
N =	9000	tr/mn
fz =	0,44	mm
ec =	0,17	mm
Ad =	10	mm²
Q =	40	cm³/mn

E = t * écart type

Essais états de surface

essai	moyenne	écart type	n	t	E	erreur (%)
us0	172,90	10,81	4	3,182	17,20	9,95
us100	178,95	10,24	4	3,182	16,29	9,10
us200	157,24	8,73	4	3,182	13,89	8,83
us400	182,99	6,47	4	3,182	10,29	5,63
us600	160,85	8,32	4	3,182	13,24	8,23
us800	186,01	5,67	4	3,182	9,02	4,85
us1000	215,54	8,74	4	3,182	13,91	6,45
us1200	206,26	10,42	4	3,182	16,58	8,04
us1400	186,01	11,10	4	3,182	17,66	9,49
us1600	192,67	10,23	4	3,182	16,28	8,45
us1800	216,35	10,14	4	3,182	16,13	7,46
us2000	179,52	9,44	4	3,182	15,02	8,37
us2200	222,14	8,76	4	3,182	13,94	6,27
us2400	197,04	9,63	4	3,182	15,32	7,78
us2600	204,04	9,84	4	3,182	15,66	7,67
us2800	221,58	10,33	4	3,182	16,44	7,42
us3000	202,74	11,45	4	3,182	18,22	8,99
us3200	253,33	10,62	4	3,182	16,90	6,67
us3400	234,23	11,81	4	3,182	18,79	8,02
us3600	239,02	10,68	4	3,182	16,99	7,11
us3800	211,60	11,44	4	3,182	18,20	8,60
us4000	243,49	12,31	4	3,182	19,59	8,04
us4200	224,15	13,24	4	3,182	21,06	9,40

distance (m)	XY (-)	XY (moy)	XY (+)	XY (droite)
0	155,70	172,90	190,10	172,19
100	162,66	178,95	195,24	173,76
200	143,35	157,24	171,13	175,33
400	172,70	182,99	193,28	178,48
600	147,61	160,85	174,09	181,63
800	176,99	186,01	195,03	184,77
1000	201,63	215,54	229,45	187,92
1200	189,68	206,26	222,84	191,06
1400	168,35	186,01	203,67	194,21
1600	176,39	192,67	208,95	197,36
1800	200,22	216,35	232,48	200,50
2000	164,50	179,52	194,54	203,65
2200	208,20	222,14	236,08	206,79
2400	181,72	197,04	212,36	209,94
2600	188,38	204,04	219,70	213,09
2800	205,14	221,58	238,02	216,23
3000	184,52	202,74	220,96	219,38
3200	236,43	253,33	270,23	222,53
3400	215,44	234,23	253,02	225,67
3600	222,03	239,02	256,01	228,82
3800	193,40	211,60	229,80	231,96
4000	223,90	243,49	263,08	235,11
4200	203,09	224,15	245,21	238,26



Paramètres d'usinage constantes:

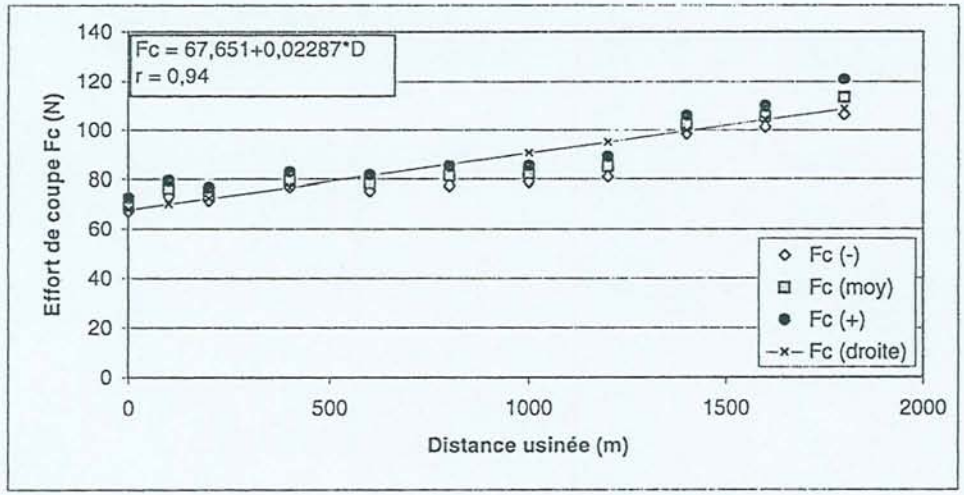
D =	14	mm
Z =	1	
ap =	2,0	mm
ae =	5,0	mm
vf =	4,0	m/mn
Vc =	6,46	m/s
N =	9000	tr/mn
fz =	0,44	mm
ec =	0,17	mm
Ad =	10	mm²
Q =	40	cm³/mn

E = t * écart type

Essais des efforts de coupe Fc(N) :

essai	moyenne	écart type	n	t	E	erreur (%)
ux0	69,73	6,25	22	2,080	2,77	3,97
ux100	76,17	7,42	24	2,069	3,13	4,11
ux200	73,80	6,38	24	2,069	2,69	3,65
ux400	79,81	6,99	24	2,069	2,95	3,70
ux600	78,40	7,54	24	2,069	3,18	4,06
ux800	81,13	8,66	22	2,080	3,84	4,73
ux1000	82,06	7,59	24	2,069	3,21	3,91
ux1200	84,89	9,22	22	2,080	4,09	4,82
ux1400	102,14	8,67	22	2,080	3,84	3,76
ux1600	105,62	10,25	23	2,074	4,43	4,20
ux1800	113,55	16,31	22	2,080	7,23	6,37

distance (m)	Fc (-)	Fc (moy)	Fc (+)	Fc (droite)
0	66,958	69,730	72,502	67,65
100	73,036	76,170	79,304	69,94
200	71,106	73,800	76,494	72,23
400	76,858	79,810	82,762	76,80
600	75,216	78,400	81,584	81,37
800	77,290	81,130	84,970	85,95
1000	78,854	82,060	85,266	90,52
1200	80,801	84,890	88,979	95,10
1400	98,295	102,140	105,985	99,67
1600	101,187	105,620	110,053	104,25
1800	106,317	113,550	120,783	108,82



Paramètres d'usinage constantes:

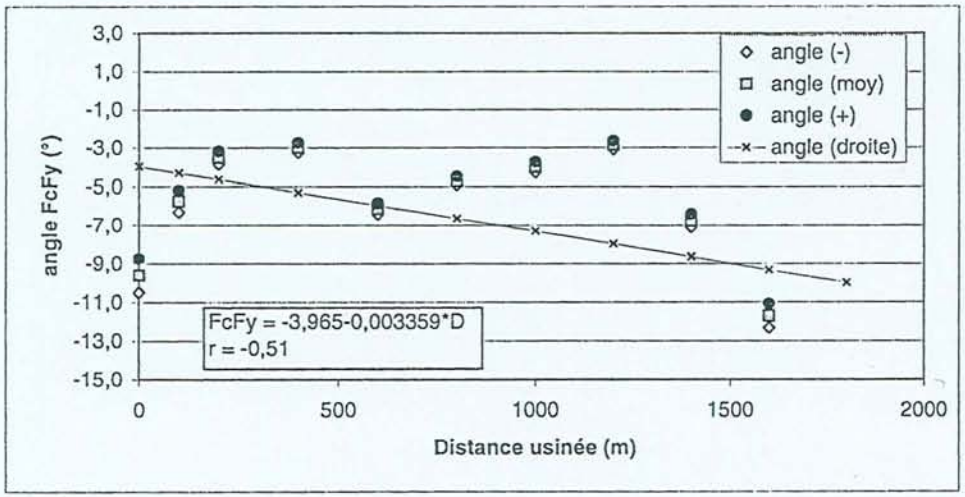
D =	14	mm
Z =	1	
ap =	2,0	mm
ae =	5,0	mm
vf =	9,0	m/mn
Vc =	6,46	m/s
N =	9000	tr/mn
fz =	1,00	mm
ec =	0,38	mm
Ad =	10	mm²
Q =	90	cm³/mn

E = t * écart type

L'angle FcFy

essai	Fx (N)	Fy (N)	angle °	écart type	n	t	E	erreur (%)
ux0	-8,91	52,46	-9,64	1,97	22	2,080	0,87	-9,06
ux100	-5,44	53,82	-5,77	1,32	24	2,069	0,56	-9,66
ux200	-2,96	48,00	-3,53	0,79	24	2,069	0,33	-9,45
ux400	-2,65	50,39	-3,01	0,59	24	2,069	0,25	-8,28
ux600	-6,80	62,95	-6,16	0,68	24	2,069	0,29	-4,66
ux800	-4,92	59,58	-4,72	0,49	22	2,080	0,22	-4,60
ux1000	-4,47	63,75	-4,01	0,62	24	2,069	0,26	-6,53
ux1200	-3,53	70,12	-2,88	0,51	22	2,080	0,23	-7,85
ux1400	-9,33	78,51	-6,78	0,78	22	2,080	0,35	-5,10
ux1600	-18,56	89,43	-11,72	1,41	23	2,074	0,61	-5,20
ux1800	-28,33	99,05	-15,96	1,68	22	2,080	0,75	-4,67

distance (m)	angle (-)	angle (moy)	angle (+)	angle (droite)
0	-10,514	-9,640	-8,766	-3,96
100	-6,327	-5,770	-5,213	-4,30
200	-3,864	-3,530	-3,196	-4,64
400	-3,259	-3,010	-2,761	-5,31
600	-6,447	-6,160	-5,873	-5,98
800	-4,937	-4,720	-4,503	-6,65
1000	-4,272	-4,010	-3,748	-7,32
1200	-3,106	-2,880	-2,654	-8,00
1400	-7,126	-6,780	-6,434	-8,67
1600	-12,330	-11,720	-11,110	-9,34
1800	-16,705	-15,960	-15,215	-10,01



Paramètres d'usinage constantes:

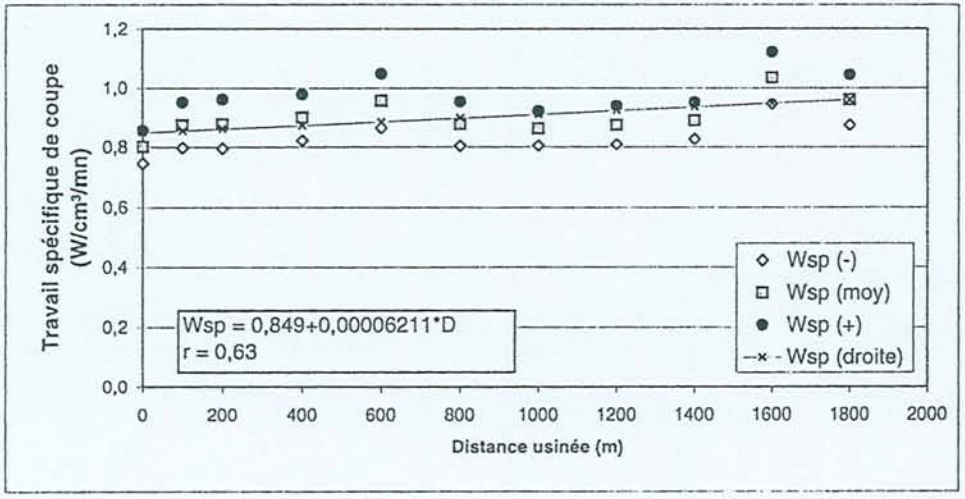
D =	14	mm
Z =	1	
ap =	2,0	mm
ae =	5,0	mm
vf =	9,0	m/mn
Vc =	6,46	m/s
N =	9000	tr/mn
fz =	1,00	mm
ec =	0,38	mm
Ad =	10	mm²
Q =	90	cm³/mn

E = t * écart type

Essais d'énergie de coupe (W/cm³/mn)

essai	Pc (W)	Wsp	écart type	n	t	E	erreur (%)
ux0	72,00	0,800	0,035	4	3,182	0,06	6,96
ux100	78,70	0,874	0,048	4	3,182	0,08	8,74
ux200	79,00	0,878	0,052	4	3,182	0,08	9,42
ux400	81,00	0,900	0,049	4	3,182	0,08	8,66
ux600	86,00	0,956	0,057	4	3,182	0,09	9,49
ux800	79,00	0,878	0,047	4	3,182	0,07	8,52
ux1000	77,70	0,863	0,037	4	3,182	0,06	6,82
ux1200	78,70	0,874	0,041	4	3,182	0,07	7,46
ux1400	80,00	0,889	0,039	4	3,182	0,06	6,98
ux1600	93,00	1,033	0,055	4	3,182	0,09	8,47
ux1800	86,30	0,959	0,053	4	3,182	0,08	8,79

distance (m)	Wsp (-)	Wsp (moy)	Wsp (+)	Wsp (droite)
0	0,744	0,800	0,856	0,849
100	0,798	0,874	0,950	0,855
200	0,795	0,878	0,961	0,861
400	0,822	0,900	0,978	0,874
600	0,865	0,956	1,047	0,886
800	0,803	0,878	0,953	0,899
1000	0,804	0,863	0,922	0,911
1200	0,809	0,874	0,939	0,924
1400	0,827	0,889	0,951	0,936
1600	0,945	1,033	1,121	0,948
1800	0,875	0,959	1,043	0,961



Paramètres d'usinage constantes:

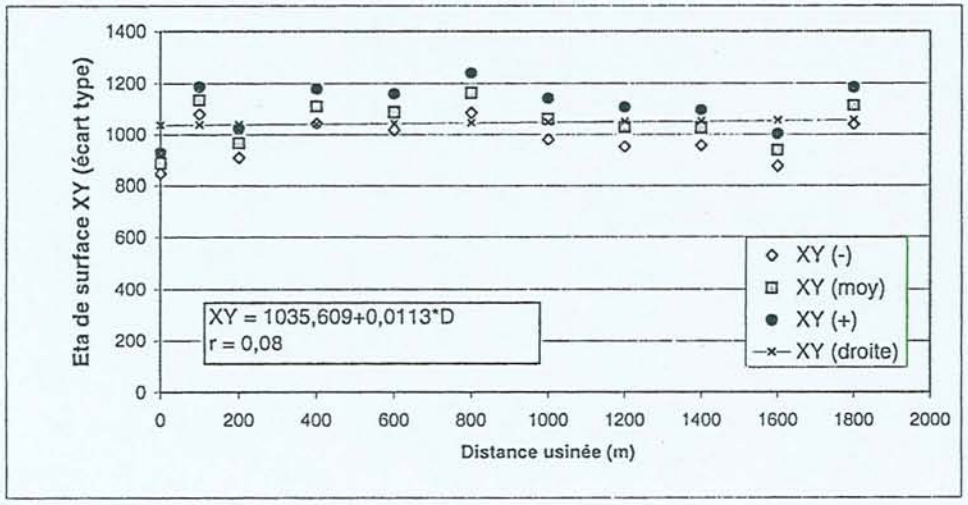
D =	14	mm
Z =	1	
ap =	2,0	mm
ae =	5,0	mm
vf =	9,0	m/mn
Vc =	6,46	m/s
N =	9000	tr/mn
fz =	1,00	mm
ec =	0,38	mm
Ad =	10	mm²
Q =	90	cm³/mn

E = t * écart type

Essais états de surface

essai	moyenne	écart type	n	t	E	erreur (%)
ux0	884,80	25,41	4	3,182	40,43	4,57
ux100	1131,90	33,62	4	3,182	53,49	4,73
ux200	964,10	35,78	4	3,182	56,93	5,90
ux400	1109,10	42,16	4	3,182	67,08	6,05
ux600	1086,30	44,39	4	3,182	70,62	6,50
ux800	1160,70	48,77	4	3,182	77,59	6,69
ux1000	1058,60	50,74	4	3,182	80,73	7,63
ux1200	1027,40	47,99	4	3,182	76,35	7,43
ux1400	1024,50	43,26	4	3,182	68,83	6,72
ux1600	936,30	39,87	4	3,182	63,43	6,77
ux1800	1110,40	44,92	4	3,182	71,47	6,44

distance (m)	XY (-)	XY (moy)	XY (+)	XY (droite)
0	844,37	884,80	925,23	1035,61
100	1078,41	1131,90	1185,39	1036,73
200	907,17	964,10	1021,03	1037,86
400	1042,02	1109,10	1176,18	1040,11
600	1015,68	1086,30	1156,92	1042,36
800	1083,11	1160,70	1238,29	1044,61
1000	977,87	1058,60	1139,33	1046,86
1200	951,05	1027,40	1103,75	1049,11
1400	955,67	1024,50	1093,33	1051,36
1600	872,87	936,30	999,73	1053,61
1800	1038,93	1110,40	1181,87	1055,86



Paramètres d'usinage constantes:

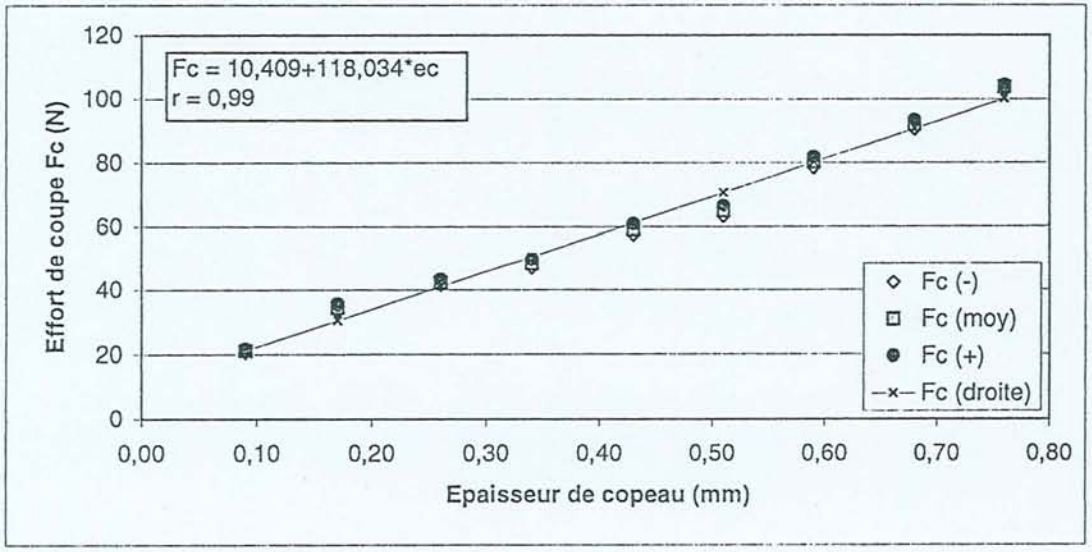
D =	14	mm
Z =	1	
ap =	2,0	mm
ae =	5,0	mm
vf =	9,0	m/mn
Vc =	6,46	m/s
N =	9000	tr/mn
fz =	1,00	mm
ec =	0,38	mm
Ad =	10	mm²
Q =	90	cm³/mn

E = t * écart type

Essais des efforts de coupe Fc(N) :

essai	moyenne	écart type	n	t	E	erreur (%)
axe1	21,06	1,337	24	2,069	0,56	2,68
axe2	34,42	2,758	24	2,069	1,16	3,38
axe3	42,39	2,044	24	2,069	0,86	2,04
axe4	48,26	3,201	24	2,069	1,35	2,80
axe5	59,07	4,011	24	2,069	1,69	2,87
axe6	64,83	3,957	24	2,069	1,67	2,58
axe7	80,04	4,097	24	2,069	1,73	2,16
axe8	91,94	3,424	24	2,069	1,45	1,57
axe9	103,74	1,609	24	2,069	0,68	0,66

ec (mm)	Fc (-)	Fc (moy)	Fc (+)	Fc (droite)
0,09	20,495	21,060	21,625	21,03
0,17	33,255	34,420	35,585	30,47
0,26	41,527	42,390	43,253	41,10
0,34	46,908	48,260	49,612	50,54
0,43	57,376	59,070	60,764	61,16
0,51	63,159	64,830	66,501	70,61
0,59	78,310	80,040	81,770	80,05
0,68	90,494	91,940	93,386	90,67
0,76	103,060	103,740	104,420	100,11



Paramètres d'usinage constantes:

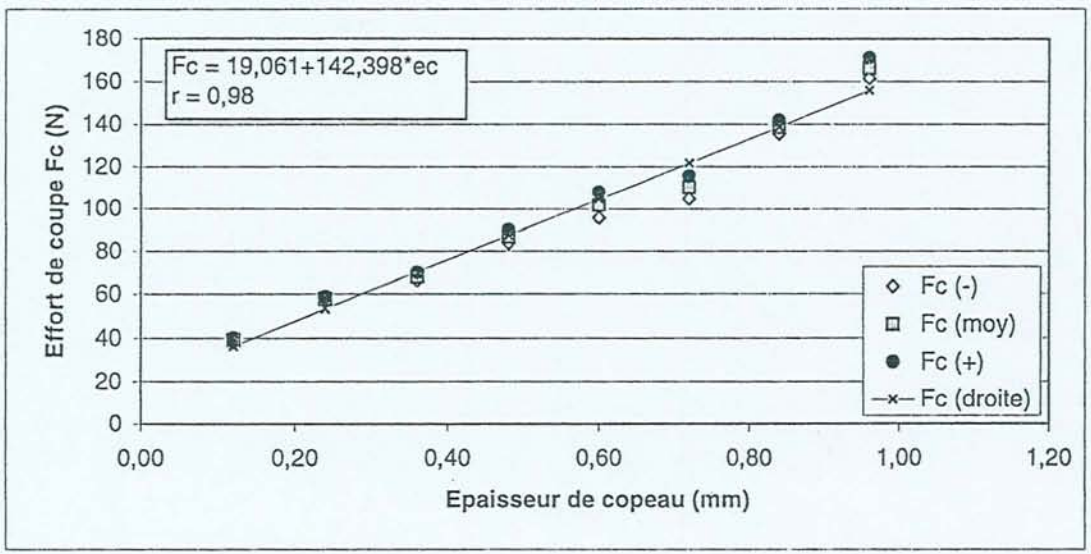
D =	14	mm
Z =	1	
ap =	2,0	mm
ae =	5,0	mm
Vc =	6,46	m/s
N =	9000	tr/mn

E = t * écart type

Essais des efforts de coupe Fc(N) :

essai	moyenne	écart type	n	t	E	erreur (%)
axe1	38,96	2,212	24	2,069	0,93	2,40
axe2	57,62	2,708	24	2,069	1,14	1,98
axe3	68,03	4,560	24	2,069	1,93	2,83
axe4	86,70	7,386	24	2,069	3,12	3,60
axe5	101,65	14,527	24	2,069	6,14	6,04
axe6	110,10	12,683	24	2,069	5,36	4,87
axe7	138,55	7,481	24	2,069	3,16	2,28
axe8	166,04	11,115	24	2,069	4,69	2,83

ec (mm)	Fc (-)	Fc (moy)	Fc (+)	Fc (droite)
0,12	38,026	38,960	39,894	36,15
0,24	56,476	57,620	58,764	53,24
0,36	66,104	68,030	69,956	70,32
0,48	83,581	86,700	89,819	87,41
0,60	95,515	101,650	107,785	104,50
0,72	104,744	110,100	115,456	121,59
0,84	135,391	138,550	141,709	138,68
0,96	161,346	166,040	170,734	155,76



Paramètres d'usinage constantes:

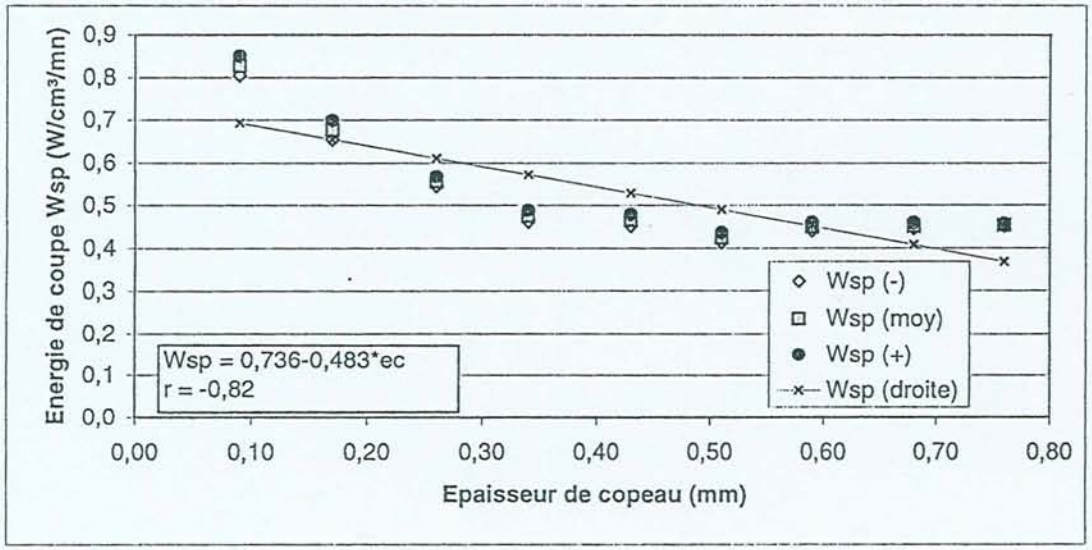
D =	14	mm
Z =	1	
ap =	4,0	mm
ae =	5,0	mm
Vc =	6,46	m/s
N =	9000	tr/mn

E = t * écart type

Essais d'énergie de coupe

essai	moyenne	écart type	n	t	E	erreur (%)
axe1	0,827	0,053	24	2,069	0,02	2,71
axe2	0,676	0,054	24	2,069	0,02	3,37
axe3	0,555	0,027	24	2,069	0,01	2,05
axe4	0,474	0,031	24	2,069	0,01	2,76
axe5	0,464	0,031	24	2,069	0,01	2,82
axe6	0,424	0,026	24	2,069	0,01	2,59
axe7	0,449	0,023	24	2,069	0,01	2,16
axe8	0,451	0,017	24	2,069	0,01	1,59
axe9	0,453	0,007	24	2,069	0,00	0,65

ec (mm)	Wsp (-)	Wsp (moy)	Wsp (+)	Wsp (droite)
0,09	0,805	0,827	0,849	0,69
0,17	0,653	0,676	0,699	0,65
0,26	0,544	0,555	0,566	0,61
0,34	0,461	0,474	0,487	0,57
0,43	0,451	0,464	0,477	0,53
0,51	0,413	0,424	0,435	0,49
0,59	0,439	0,449	0,459	0,45
0,68	0,444	0,451	0,458	0,41
0,76	0,450	0,453	0,456	0,37



Paramètres d'usinage constantes:

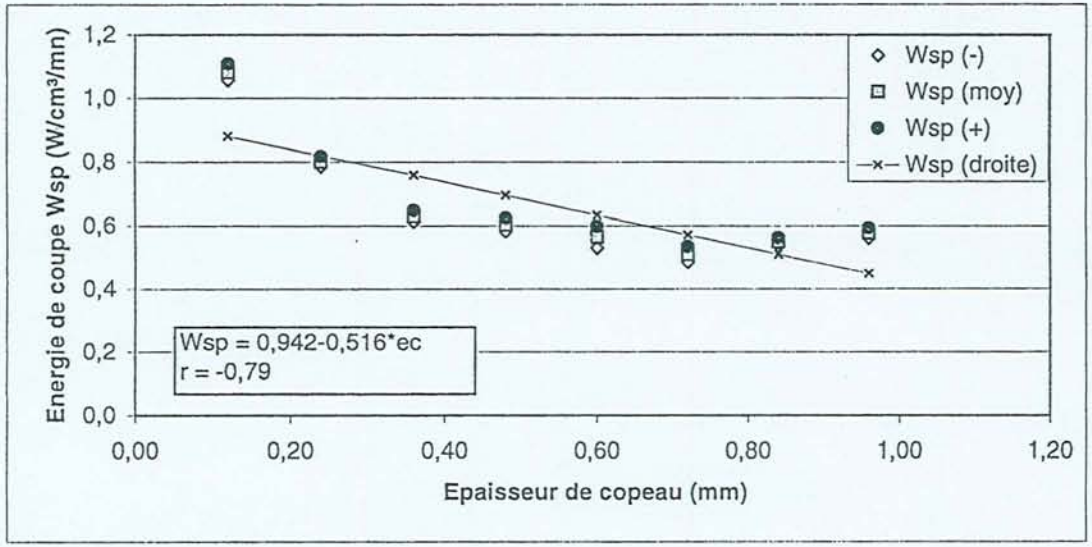
D =	14	mm
Z =	1	
ap =	2,0	mm
ae =	5,0	mm
Vc =	6,46	m/s
N =	9000	tr/mn

E = t * écart type

Essais d'énergie de coupe

essai	moyenne	écart type	n	t	E	erreur (%)
axe1	1,08	0,061	24	2,069	0,03	2,38
axe2	0,80	0,038	24	2,069	0,02	2,01
axe3	0,63	0,042	24	2,069	0,02	2,82
axe4	0,60	0,051	24	2,069	0,02	3,58
axe5	0,56	0,081	24	2,069	0,03	6,07
axe6	0,51	0,059	24	2,069	0,02	4,90
axe7	0,55	0,030	24	2,069	0,01	2,31
axe8	0,58	0,039	24	2,069	0,02	2,86

ec (mm)	Wsp (-)	Wsp (moy)	Wsp (+)	Wsp (droite)
0,12	1,056	1,082	1,108	0,88
0,24	0,784	0,800	0,816	0,82
0,36	0,612	0,630	0,648	0,76
0,48	0,580	0,602	0,624	0,69
0,60	0,530	0,564	0,598	0,63
0,72	0,484	0,509	0,534	0,57
0,84	0,536	0,549	0,562	0,51
0,96	0,560	0,576	0,592	0,45



Paramètres d'usinage constantes:

D =	14	mm
Z =	1	
ap =	4,0	mm
ae =	5,0	mm
Vc =	6,46	m/s
N =	9000	tr/mn

E = t * écart type

OPTIMISATION DES CONDITIONS DE COUPE POUR L'USINAGE DU BOIS. APPLICATION DE LA METHODE DU COUPLE OUTIL MATIERE (C.O.M.) AU DEFONÇAGE DES PANNEAUX DE FIBRES DE DENSITE MOYENNE.

La description des produits par des entités (d'usinage, de production, ...) permet une aide fondamentale pour les techniciens, afin d'orienter les choix de type de machine, d'outils, de processus.

La détermination des conditions de coupe est intimement liée au processus, de conception et de fabrication d'un objet. Dans le domaine du bois il est important d'établir une base de données usinage spécifique, pour les machines – outils qui participent au processus de fabrication. Chaque entité requiert des conditions d'usinage liées à sa forme et à sa composition, pour un état de surface correct, et un travail en sécurité.

L'objectif de cette recherche est d'étudier la faisabilité de la méthodologie du Couple Outil - Matière (C.O.M.) pour la prédétermination des conditions de coupe pour des matériaux à base du bois. L'application est centrée sur des produits issus du processus de la seconde transformation du bois. Cette méthode définit le domaine de fonctionnement des outils coupants en prenant en compte tous les paramètres de coupe et en limitant le nombre d'expériences à réaliser par la méthode des plans d'expérience.

Nous avons appliqué cette méthode dans le cas du défonçage du panneau de fibres de densité moyenne, le MDF, avec de bons résultats. Avec une caractérisation complète du matériau, nous avons réalisé la détermination des paramètres de coupe, en contrôlant les efforts de coupe, puissance et états de surface. Pour contrôler l'usure de l'arête de coupe, nous avons développé une méthode expérimentale en considérant la variation d'orientation de l'effort de coupe moyen.

Les perspectives du travail se montrent très intéressantes avec l'apparition de nouveaux matériaux de coupe et des usinages à des vitesse toujours plus grandes (UGV). La nécessité de prédéterminer de conditions de coupe pour un bon achèvement des procédés de fabrication de produits en bois est facilitée par l'utilisation du COM.

Mots–clés : usinage, MDF, coupe, efforts, puissance, seconde transformation, outil, défonçage, COM.

CUTTING CONDITIONS OPTIMISATION IN WOOD MACHINING. COUPLE TOOL MATERIAL (C.O.M.) METHOD APPLY TO A MDF'S ROUTING.

Fundamental element for engineers are the features representation of products (machining, production, ...). That permits to guide them during fixing needs of tools and machines in a specific machining procedure.

Cutting conditions determination hardly controls design and manufacturing processes. The machining database it is important in the wood field, specific to each tool-machine. In this way, each feature could reach particular machining conditions according to his form and composition, for a right surface roughness and safe work.

The objective of this research is to analyse the feasibility the predetermining method of cutting conditions, for wood based materials : Couple Tool Material method. Scope of the application is centred in second processing wood industry products. This method define the working field of cutting tools taking into account the cutting parameters and limiting the number of experiments.

The application of this method in Medium Density Fibreboard routing has shown good results. Determination of cutting parameters is possible with checking cutting forces, power and surface roughness. A complete characterisation of studied material was done. To control tool wear, a method was developed, that considers angular variation of cutting forces.

Working perspectives are very interesting with the appearance of new material cutting and high speed cutting processes. So, the necessity to compute good working conditions in these wood cutting processes will be easier, with utilisation of Couple Tool Material data.

Keywords : machining, MDF, cutting, forces, power, wood second processing, tool, routing.